

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Método da substituição dinâmica aplicado a solo laterítico
argiloso**

Tennison Freire de Souza Júnior

Porto Alegre

2021

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Método da substituição dinâmica aplicado a solo laterítico argiloso

Tennison Freire de Souza Júnior

Orientadora: Prof. Dra. Karla Salvagni Heineck

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor no Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre

2021

Tennison Freire de Souza Júnior

Método da substituição dinâmica aplicado a solo latérico argiloso

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de outubro de 2021

Prof^a Karla Salvagni Heineck
Dra. em Engenharia Civil UFRGS, Brasil
Orientadora

Prof. Lucas Festugato
Dr. em Engenharia Civil UFRGS, Brasil
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo César Consoli (UFRGS)
Ph.D pela Concordia University, Canadá

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande (UNB)
Dr^a. em Engenharia Civil UFRGS, Brasil

Prof. Vitor Pereira Faro (UFPR)
Dr. em Engenharia Civil UFRGS, Brasil

Prof^a. Ana Paula Vianna Mohseni (UF)
Dr^a. em Engenharia Civil USP São Carlos, Brasil

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta intensa trajetória do doutorado, deparei-me com muitas descobertas e desafios profissionais. Para atingir meus objetivos, eu pude contar com o auxílio de pessoas incríveis e que foram fundamentais para a sua concretização.

Primeiramente, eu agradeço à DEUS, por ter me tornado um instrumento da sua vontade, além de me fornecer forças para perseverar e continuar a lutar por este sonho.

Agradeço incondicionalmente aos meus pais, Tennison e Josaildes, por terem me incentivado, me dado amor, carinho e apoiado no decorrer da minha jornada acadêmica. Vocês são as pessoas mais incríveis do meu mundo!

Agradeço, em especial, a minha avó Marieta Freire (*in memorian*) e a minha tia e madrinha Mercedes Freire por toda força, amor, palavras de carinho e sabedoria durante a minha fase acadêmica. Vocês foram de extrema importância para minha construção acadêmica e humana.

À família "Ferrutti" (Luiz, Carla, Luca e a minha namorada Marcela) e a Angela Dornell, por todos os conselhos, carinho, motivação e suporte básico (alimento e abrigo) e financeiro nos momentos em que fui a Curitiba para empréstimo de equipamentos e realização de ensaios do doutorado. Esses recursos foram imprescindíveis para efetivação da minha pesquisa.

Expresso meus agradecimentos às agências nacionais de fomento CAPES e CNPQ por ter fornecido recursos financeiros para realização das pesquisas e ensaios e financiar os programas de pós-graduação do Brasil.

À minha orientadora Prof^a Eng^a. Civil Karla Heineck e meu coorientador Prof. Eng. Civil Nilo Consoli pelos conhecimentos transmitidos, a amizade criada e a minha aceitação como aluno de pesquisa e membro do PPGEC.

Ao Prof. Eng. Civil Cesar Alberto Ruver, agradeço imensamente ao aprendizado que tive ao longo da pesquisa, assim como apoio moral prestado. Suas palavras motivacionais e ensinamentos foram significativos para o bom desfecho do meu trabalho, mas acima de tudo, agradeço a amizade valorosa construída ao longo deste ciclo.

Agradeço aos meus eternos professores e grandes amigos Prof. Luis Edmundo Prado Campos (UFBA), Prof. Sidnei Helder Cardoso Teixeira (UFPR) e Prof. Vítor Pereira Faro (UFPR) por terem escrito as minhas cartas de recomendação para ingressar na UFRGS. Sem vocês nada disso seria possível!

Presto meus agradecimentos aos funcionários do LABGEO da UFBA (Prof. Eng^a. Civil Luciene Moraes, Técnico Armando, Julio e Neto) pelas ajudas com ensaios triaxiais da Areia

de Osório/RS. Bom saber que sempre que precisei, eu pude contar com os colegas da minha *Alma Mater*.

Aos membros da empresa de geotecnia Fugro em Curitiba (em especial a Eng^a. Civil Lilian Swinka, Eng. Civil José Pretto, Eng. Civil Guilherme Mafia, Eng^a Civil Laisa Benetti, Eng. Civil Hyllttonn Bazan e o Tec. André Morais) pelas ajudas com os ensaios triaxiais dos solos melhorados, empréstimo do equipamento sismógrafo e testes com o inclinômetro. Vocês foram incríveis comigo!

Aos engenheiros mecânicos Msc. Gustavo Meneghello e Anderson Bonsanto, eu agradeço o tempo e conhecimento investido no desenvolvimento da simulação numérica do gatilho.

Aos membros do GMAP, Prof. Dr. Ignácio Itturioz, Prof. Dr. Gabriel De Leon, Técnico Rodrigo e Prof. Carlos Thomas (“vulgo Pato”) por disponibilizarem seu tempo, conhecimento e recursos do laboratório de Engenharia Mecânica do GMAP para que eu pudesse testar o gatilho da compactação dinâmica.

Agradeço ao Prof. Eng mecânico Cezar Neitzke e o Técnico Leonardo Souza pelas ajudas prestadas quanto a calibração do inclinômetro. Vocês foram muito prestativos no empréstimo do espaço, suporte técnico e acima de tudo pela paciência!

Aos meus ex-estagiários da UFRGS, Thales e Guilherme, pelas ajudas com a confecção dos corpos de prova de solo melhorado em estudos preliminares da tese de doutorado.

Aos colegas de PPGEC Eng. Civil Daniel Matos, pelas ajudas prestas com a interpretação dos dados do sismógrafo obtidos no campo experimental e ao colega Eng. Civil Lucas Borges, eu agradeço pelas ajudas prestadas com o desenvolvimento da programação e circuito eletrônico da sonda inclinométrica experimental. Também ao Eng. Civil Caio Cesar Cardoso por ter me fornecido abrigo, alimento e suporte em Porto Alegre no período da qualificação do Doutorado.

Aos Professores da UPF. Eng. Civil Francisco Dalla Rosa, pelas trocas de conhecimento, parceria em artigo científico e ajudas prestadas na manutenção da célula de carga no decorrer dos ensaios de placa, e ao Eng. Civil Luizmar da Silva Lopes Jr. e a empresa Multisolos, pelas trocas de conhecimento e realização de ensaios SPT no campo CETEC.

Aos funcionários e estagiários da UPF (Leunir, Matheus, Newton, Ireno, Alisson e Eng. Civil Eduardo Basso), eu agradeço a todo suporte com os ensaios de campo e laboratório, as trocas de conhecimento, mas acima de tudo, pela amizade construída ao longo da pesquisa.

Sinceros agradecimentos ao senhor Álvaro da tornearia próxima ao Campus da UPF pelas ajudas prestadas nas modificações do gatilho em momentos urgentes da pesquisa.

Agradeço também a senhora Maria Inês, proprietária da residência que habitei em Passo Fundo ao longo do período de ensaios de campo, por ter me disponibilizado o seu lar durante o tempo que morei em Passo, por ter cuidado de mim em momentos difíceis e acima tudo pela sua amizade construída.

Aos amigos Felipe Cunha, Luiz Pereira (vulgo “Lula”) e Felipe (vulgo “Pequeno”) pelas ajudas prestadas com o notebook (problemas e instalação de softwares) no decorrer do doutoramento. Me ajudaram efetivamente em momentos críticos!

Por fim, eu agradeço aos serviços prestados de construção da coluna granular pelos representantes da tribo Kaingang da aldeia do centro de Passo Fundo. Em especial, eu agradeço ao Cacique Jocemar Mariano e a senhora Maria Inês por terem intermediado as negociações com os membros da tribo.

RESUMO

SOUZA JUNIOR, T.F. 2021. Método da substituição dinâmica aplicado a solo laterítico argiloso. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O método da substituição dinâmica é uma alternativa bastante difundida em vários países do mundo como técnica de melhoramento de solos com baixa capacidade de suporte, compressíveis e/ou colapsíveis. Embora seja um método consagrado em variados tipos de solos, não existem relatos científicos de uso em solos saprolíticos e/ou lateríticos. Tendo em vista as lacunas técnico-científicas do método, esta pesquisa tem como proposta desenvolver um método de melhoramento de solo através da combinação da substituição dinâmica em um solo laterítico argiloso típico com adição de camadas melhoradas por misturas de solo-cimento compactadas em escala de protótipo. O programa experimental foi desenvolvido com 6 pontos de estudos (PEs) fundamentado para compreensão dos efeitos dos parâmetros L (1V e 2V) referente a coluna granular compactada e H_{cam} (S/ camada, 150 mm e 500 mm) referente as camadas compostas por solo granular (Areia de Osório/RS) tratadas com cimento CP V ARI compactadas. Durante a construção dos PE's foram medidas as velocidades de propagação de ondas superficiais (V_x , V_y e V_z) por meio de um sismógrafo. Estabelecidas as variáveis de investigação, após a construção dos PEs foram realizados ensaios de placa ($D_{pl} = 300$ mm), ensaios de SPT, ensaios de laboratório com testemunhos, avaliados os modos de falha, realizadas simulações numéricas por MEF e comparados as respostas dos ensaios de placa. Os resultados indicaram que a variação do parâmetro L não desempenhou melhorias expressivas no solo estudado, contrariamente ao parâmetro H_{cam} que desempenhou melhoria de 200% a 1200% em relação a capacidade de suporte do solo natural, como também aumento da rigidez do solo. Os ensaios de laboratório e de campo constataram densificação do solo até 3m de profundidade. Em relação ao modo de falha, em geral, as camadas romperam por punção com algumas distinções dependendo H_{cam} , no caso da coluna granular houve ruptura generalizada. Quanto a V_x , V_y e V_z se obteve uma relação em função D_w e H . Por fim, foi desenvolvido, testado e validado um inclinômetro experimental de proporções reduzidas e baixo custo.

Palavras-chave: Substituição dinâmica, solo laterítico argiloso, camadas melhoradas, melhoramento de solos, inclinômetro experimental.

ABSTRACT

SOUZA JUNIOR, T.F. 2021. Dynamic replacement method applied in clay lateritic soil. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) - Post-Graduation Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The dynamic replacement method is a widespread alternative in several countries around the world as a technique for improving soils with low bearing capacity, compressible and/or collapsible. Although it is an established method in various types of soils, there are no scientific reports of its use in saprolitic and/or lateritic soils. In view of the technical-scientific gaps of the method, this research aims to develop a method of soil improvement by combining the dynamic replacement in a typical clayey lateritic soil with addition of layers improved by compacted soil-cement mixtures in prototype scale. The experimental program was developed with 6 study points (PE's) grounded for understanding the effects of the parameters L (1V and 2V) referring to the compacted granular column and H_{cam} (S/ layer, 150 mm and 500 mm) referring to the layers composed by granular soil (Osório sand) treated with compacted CP V ARI Portland cement. During the construction of the PE's the velocities of propagation of superficial waves (V_x , V_y and V_z) were measured by means of a seismograph. After establishing the investigation variables, after the construction of the PEs, plate tests ($D_{pl} = 300$ mm), SPT tests, laboratory tests with core samples were performed, failure modes were evaluated, numerical simulations were performed by FEM and the responses of the plate tests were compared. The results indicated that the variation of parameter L didn't perform expressive improvements in the soil studied, contrary to the parameter H_{cam} that performed an improvement of 200% to 1200% in relation to the bearing capacity of the natural soil, as well as an increase in soil stiffness. The laboratory and field tests found soil densification up to 3m in depth. In relation to the failure mode, in general, the layers ruptured by punching with some distinctions depending on H_{cam} , in the case of the granular column there was generalized rupture. As for V_x , V_y and V_z , a relationship was obtained as a function of D_w and H. Finally, an experimental inclinometer of reduced proportions and low cost was developed, tested and validated.

Keywords: Dynamic replacement, Clayey Lateritic Soil, improved layers, soil improvement, soil improvement, experimental inclinometer.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	35
1.2	OBJETIVO GERAL.....	36
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
1.4	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	37
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
2.1	USO DE COMPACTAÇÃO DINÂMICA E SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA NA HISTÓRIA	38
2.2	MECANISMO DE DENSIFICAÇÃO	41
2.2.1	Densificação de solos granulares.....	43
2.2.2	Densificação de solos argilosos.....	46
2.2.3	Densificação de solo laterítico argiloso.....	52
2.3	SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA.....	54
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM NA SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA	59
2.5	FORMAÇÃO DE CRATERAS – CARACTERÍSTICAS E FORMULAÇÕES EMPÍRICAS.....	60
2.5.1	Relação entre o número de golpes a profundidade da cratera	61
2.5.2	Melhoramento em profundidade da cratera.....	69
2.5.3	Espaçamentos entre pontos de impacto, fases e quantidade de golpes	73
2.5.4	Subdivisão categórica dos solos	79
2.5.5	Desaceleração do martelo de compactação e força de impacto.....	81
2.5.6	Vibrações no solo	82
2.5.7	Frequência das partículas – recomendações e limitações.....	93
2.6	COMPACTAÇÃO DINÂMICA/SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA– EQUIPAMENTOS, ESPECIFICAÇÕES E PROCEDIMENTOS	95
2.6.1	Equipamentos estáticos em estruturas treliçadas <i>onshore</i>	95
2.6.2	Equipamentos em plataformas móveis com lanças treliçadas <i>onshore</i>	96
2.6.3	Equipamentos dinâmicos <i>onshore</i> – <i>Rapid Impact Compaction (RIC)</i>	98
2.6.4	Equipamentos de compactação dinâmica <i>offshore</i>	100
2.6.5	Martelo de compactação – formatos e especificações.....	102
2.6.6	Procedimento de controle do melhoramento por compactação dinâmica/ substituição dinâmica	105
2.7	EXEMPLOS DE MODELAGEM NUMÉRICA PARA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DINÂMICA E SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA	107
2.7.1	Modelagem numérica unidimensional	107
2.7.2	Modelagem numérica bidimensional	108
2.7.3	Modelagem numérica tridimensional	113

2.8	MELHORAMENTO DE SOLOS – SOLOS TRATADOS COM CIMENTO E SOLO-CIMENTO	115
2.8.1	Aplicações de solos tratados com cimento e misturas de solo-cimento	115
2.8.2	Distinções entre solos tratados com cimento vs solo-cimento	116
2.8.3	Estudos de solos tratados com cimento e misturas de solo-cimento	118
2.9	ENSAIO DE PLACA EM FUNDAÇÕES APOIADAS EM SOLOS E EM CAMADAS MELHORADAS	123
2.10	MODOS DE FALHA DAS COLUNAS GRANULARES DE SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA.....	128
2.11	EQUAÇÕES TEÓRICAS	131
2.12	EQUIPAMENTO INCLINÔMETRO – CONCEITOS, ASPECTOS HISTÓRICOS, INSTALAÇÃO, TIPOS E INTERPRETAÇÃO	137
2.12.1	Aspectos históricos dos inclinômetros	138
2.12.2	Tipos e elementos componentes do inclinômetro	140
2.12.3	Procedimentos de leituras e aquisição de dados.....	151
2.12.4	Erros, acurácia e sensibilidade de medições com inclinômetro	153
2.12.5	Inclinômetros experimentais	157
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	161
4	MATERIAIS	164
4.1	CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL – CP V ARI RS.....	164
4.2	AREIA DE OSÓRIO/RS.....	164
4.3	ÁGUA POTÁVEL	169
5	MÉTODOS.....	170
5.1	CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA.....	170
5.2	CONCEPÇÃO DO GATILHO (TRIGGER)	171
5.3	CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DO INCLINÔMETRO EXPERIMENTAL	178
5.3.1	Inclinômetro <i>MEMS</i>	179
5.3.2	Estrutura da sonda inclinométrica	181
5.3.3	Componentes eletrônicos usados na aquisição e transferência de dados	182
5.3.4	Circuito eletrônico desenvolvido.....	184
5.4	ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNIVERSIDADE PASSO FUNDO/ RS	188
5.4.1	Localização do estudo	188
5.4.2	Solo laterítico argiloso de Passo Fundo/RS.....	189
5.4.3	Locação dos pontos de estudo	197
5.4.4	Especificação dos equipamentos utilizados no campo experimental	198
5.4.5	Procedimentos operacionais da substituição dinâmica no campo experimental	202

5.4.6	Medições de desaceleração do martelo	203
5.4.7	Medições de vibrações do solo	204
5.4.8	Definição da profundidade da coluna granular e da espessura da camada melhorada	205
5.4.9	Controle de qualidade das colunas granulares.....	212
5.4.10	Construção das camadas melhoradas	212
5.4.11	Ensaio de Placa – Equipamentos e procedimentos.....	214
5.5	EXUMAÇÃO DAS COLUNAS GRANULARES	220
5.6	ENSAIOS DE SPT DAS COLUNAS GRANULARES COM ADIÇÃO DE CAMADAS MELHORADAS	221
5.7	VERIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO LATERÍTICO	221
5.8	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	222
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	223
6.1	GATILHO DA COMPACTAÇÃO DINÂMICA (TRIGGER)	223
6.1.1	Ensaio de verificação do aço gatilho (<i>Trigger</i>).....	224
6.1.2	Ensaio de verificação do gatilho (<i>Trigger</i>)	225
6.2	DESACELERAÇÃO DO MARTELO DE COMPACTAÇÃO.....	226
6.3	CONTROLE DE QUALIDADE DAS COLUNAS GRANULARES	228
6.4	MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DO SOLO	231
6.5	ENSAIO DE PLACA SOBRE SOLO NATURAL E COLUNAS	243
6.5.1	Resultados dos ensaios de placa nas colunas e no solo natural	243
6.5.2	Modos de falha das colunas de reforço e do solo natural.....	247
6.6	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NÃO CONFINADA	252
6.7	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SUCCÃO PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO..	254
6.8	EXUMAÇÃO DAS COLUNAS GRANULARES	255
6.9	RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DO TIPO CID NA ÁREA DE OSÓRIO/RS	258
6.10	RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DO TIPO CID DAS AMOSTRAS DAS CAMADAS MELHORADAS	264
6.11	RESULTADOS DO ENSAIO DE SPT NAS COLUNAS GRANULARES.....	270
6.12	RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO LATERÍTICO ABAIXO DA COLUNA GRANULAR	273
6.13	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MELHORAMENTO DE SOLO PROPOSTO	275

6.14	VALIDAÇÃO DA SONDA INCLINOMÉTRICA EXPERIMENTAL.....	282
6.14.1	Calibração da sonda inclinométrica experimental.....	283
6.14.2	Teste comparativo entre sonda experimental e a sonda comercial.....	286
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	289
8	CONCLUSÕES.....	290
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	297
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	298
	APÊNDICE A - PROJETO GEOMÉTRICO DA SONDA INCLINOMÉTRICA - UFRGS.....	316
	APÊNDICE B - DETALHAMENTO DO GATILHO (TRIGGER).....	321
	APÊNDICE C - LOCAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO NO CAMPO EXPERIMENTAL.....	329
	APÊNDICE D - ENSAIOS TRIAXIAIS CID (CONSOLIDADO ISOTRÓPICO DRENADO) DA CAMADA MELHORADA COM CIMENTO	331

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de densificação do solo após à compactação. (Fonte: Jia <i>et al.</i> , 2018) ...	42
Figura 2 – Microestrutura dos Solos granulares: a) Estado natural; b) Medianamente denso após compactação; c) Estado altamente denso após compactação. (Fonte: Própria, 2020)	44
Figura 3 – Comparação existente entre a Teoria de consolidação clássica e a Teoria de consolidação dinâmica. (Fonte: Menard e Broise, 1975)	48
Figura 4 – Mudanças no comportamento do solo após passagem única. (Fonte: traduzido de Menard e Broise, 1975)	50
Figura 5 – Mudanças no comportamento do solo em situações de passagens múltiplos de consolidação dinâmica. (Fonte: Menard e Broise, 1975)	51
Figura 6 – Ilustração do procedimento da substituição dinâmica em solos. (Fonte: Vibromenard, 2019).....	55
Figura 7 – Projeto de <i>Jaber Al-Ahmad City</i> : a) Planta de localização do projeto; b) <i>Grid</i> de compactação do projeto de <i>Jaber Al-ahmad City</i> . (Fonte: Tarawneh <i>et al.</i> , 2017).....	57
Figura 8 – Aplicação do método da substituição dinâmica na obra do <i>Abu Dhabi Ritz Carlton Hotel</i> em Abu Dhabi (Emirados Árabes): a) simulação do fator de segurança com a solução adotada; b) escavação mecanizada do solo; c) compactação dinâmica do material substituído. (Fonte: Hamidi, 2014)	57
Figura 9 – Resultados obtidos após construção de uma coluna granular por substituição dinâmica. (Fonte: Sekowski <i>et al.</i> , 2018)	58
Figura 10 – Relação entre a formação da cratera e o número de golpes ocorridos no solo. (Fonte: Mayne <i>et al.</i> , 1984 modificado por Giese (2019).....	62
Figura 11 – Formação de cratera normalizada: a) Variados tipos de solos pelo (Fonte: Mayne <i>et al.</i> , 1984); b) Solo laterítico de Passo Fundo/RS. (Fonte: Giese, 2019).....	62
Figura 12 – Extensão dos bulbos compactados: a) contorno computacional e experimental dos bulbos compactados; b) formato aproximado das profundidades melhoradas após a compactação dinâmica (Fonte: Póran e Rodriguez, 1992); c) formato simplificado. (Fonte: Oshima e Takada, 1997).....	66
Figura 13 – Modelo estocástico de evolução de cratera e profundidade de melhoramento: a) Diagrama de deformação em ponto; b) seção transversal idealizada da compactação dinâmica. (Fonte: Du <i>et al.</i> , 2019)	68
Figura 14 – Modelo semiempírico de profundidade efetiva do solo após compactação dinâmica: a) Diagrama de desenvolvimento da cunha plástica; b) Penetração calculada em função da energia específica. (Fonte: Mullins <i>et al.</i> , 2000)	69
Figura 15 – Variação do melhoramento do solo em função da profundidade durante a compactação dinâmica. (Fonte: Lukas, 1995)	70
Figura 16 – Deslocamentos laterais medidos pela compactação dinâmica a 60cm de distância do martelo: a) a 3,0 m de altura com 5,5 tf; b) 12m de altura com 5,5 tf. (Fonte: Giese, 2019)	72
Figura 17 – Deslocamentos de solos após o contato do peso com o solo: a) Martelo de compactação simples; b) com distância de compactação de 5D _m . (Fonte: Hajialilue-Bonab e Zare, 2014).....	72
Figura 18 – Melhoramento do solo ao entorno do peso, pontos de estacas e caixões. (Fonte: Chow <i>et al.</i> , 1994)	75
Figura 19 – Curvas de projeto para seleção de espaçamento (<i>Print</i>) através da compactação dinâmica: (a) centro; (b) meio de um lado. (Fonte: Chow <i>et al.</i> , 1994).....	77

Figura 20 – Aumento de Dr entre os pontos de compactação. (Fonte: Hajjalilue-Bonab e Zare, 2014).....	77
Figura 21 – Deformações ocorridas no solo do modelo com peso de diâmetro $4D_m$ na compactação dinâmica. (Fonte:Hajjalilue-Bonab e Zare, 2014)	78
Figura 22 – <i>Grid</i> de compactação: a) projeto da baía de Daya na China (Fonte: Feng <i>et al.</i> , 2011); b) plantas de Bangladesh e na Espanha. (Fonte: Ó'Brien e Guptan, 1984).....	79
Figura 23 – Zoneamento dos tipos de solos úteis na compactação dinâmica a partir das suas propriedades e parâmetros. (Fonte: Lukas, 1995)	80
Figura 24 – Modelo de desaceleração do martelo de compactação: a) esquema teórico; b) gráficos de desaceleração do martelo. (Fonte: Oshima e Takada, 1994)	81
Figura 25 – Propagação de ondas sísmicas em um solo: a) Ondas P; b) Ondas S. (Fonte: Haldar, 2018).....	83
Figura 26 – Mecânica da propagação de ondas em um solo após a imposição da compactação dinâmica. (Fonte: Traduzido de Bo <i>et al.</i> , 2009).....	84
Figura 27 – Decaimento da aceleração de ondas no solo. a) aceleração do peso (diâmetro = 1,8 m, massa = 16,5 toneladas) após atingir solo <i>in natura</i> de uma altura de queda de 1 m; b) avaliação de amortecimento de vibrações do solo livre, a partir de parâmetros dinâmicos para um SDOF com viscosidade. (Fonte: Kopf <i>et al.</i> , 2010)	86
Figura 28 – Propriedades mecânicas das vibrações em um sistema de um único grau de liberdade: Esquema e equações da resposta de vibração livre e forçada no domínio do tempo e da frequência. (Fonte: Kopf <i>et al.</i> , 2010)	86
Figura 29 – Limites de PPV por faixas de frequência em minerações e áreas urbanas no Brasil. (Fonte: NBR 9653,2005)	90
Figura 30 – Níveis seguros de vibração oriunda da detonação em edificações a partir da combinação de velocidade de partícula e deslocamentos gerados. (Fonte: Lukas, 1995).....	90
Figura 31 – Atenuação de vibrações no solo medidas em diferentes projetos de compactação dinâmica. (Fonte: Mayne <i>et al.</i> , 1984).....	92
Figura 32 – Tripé de Menard usado na compactação dinâmica. (Fonte: Hamidi, 2014)	96
Figura 33 – a) Equipamento de compactação dinâmica com energia de 7 MNm; b) Mega máquina compactação dinâmica com energia de 16 MNm. (Fonte: Hamidi, 2014).....	97
Figura 34 – Guindastes sobre esteiras usados na compactação dinâmica: a) Guindaste com esteiras com peso de 15 toneladas; b) Guindaste com esteiras com martelo compactador de 10 toneladas. (Fonte: Lauzon <i>et al.</i> , 2011)	98
Figura 35 – Equipamento sobre esteiras de compactação – <i>RIC</i> . (Fonte: Lauzon <i>et al.</i> , 2011)	99
Figura 36 – Equipamento de compactação dinâmica <i>offshore</i> em barcos de grandes dimensões: a) Embarcação de compactação; b) Martelo de compactação. (Fonte: Hamidi, 2014).....	101
Figura 37 – Equipamento de compactação dinâmica <i>offshore</i> em plataformas marítimas. (Fonte: Hamidi, 2014).....	102
Figura 38 – Tipos de martelos usados na compactação dinâmica: a) Pilão de aço; b) Pilão de concreto; c) Pilão de aço plano. (Fonte: Kopft <i>et al.</i> , 2010).....	103
Figura 39 – Efeito da variação do raio da base na profundidade de melhoria do solo. (Fonte: Gu e Lee, 2002)	104
Figura 40 – Esquema de avaliação da compactação dinâmica através da abordagem unidimensional. (Fonte: Chow <i>et al.</i> ,1990)	108
Figura 41 – Modelo axissimétrico em elemento finito com abordagem bidimensional. (Fonte: Lee e Gu,2004)	110
Figura 42 – Distribuição de índice de vazios de 1 a 3 golpes através de uma abordagem bidimensional axissimétrica do método dos elementos finitos. (Fonte: Mostafa, 2010)	111

Figura 43 – Formações de colunas granulares DR: a) Fase inicial; b) Estágio 3; c) Estágio 5; d) Estágio 7. (Fonte: Solowski <i>et al.</i> , 2013)	112
Figura 44 – Comparação entre fenômeno de formação de colunas granulares DR com os resultados da aplicação do método do ponto material: a) Estágio 3; b) Estágio 5. (Fonte: Solowski <i>et al.</i> , 2013)	113
Figura 45 – Simulação numérica de um caso de coluna DR: a) Modelagem computacional de uma coluna de areia DR no ABAQUS®; b) Resultados dos deslocamentos sofridos após simulação por elementos finitos com carga final (225kPa). (Fonte: Tarawneh <i>et al.</i> , 2019). 114	114
Figura 46 – Relação V_v/V_{ci} vs q_u . (Fonte: adaptado de LARNACH, 1960)	119
Figura 47 – Relação de parâmetros-chave no comportamento resistente do Arenito Botucatu melhorado com cimento Portland: a) q_u vs C_{iv} ; b) q_u vs η . (Fonte: Foppa, 2005)	120
Figura 48 – Relação η/C_{iv} vs q_u do arenito melhorado com cimento. (Fonte: Foppa, 2005) .	121
Figura 49 – Superfícies de rupturas das camadas melhoradas: a) $H_{cam}/D_{pl} = 0,25$; b) $H_{cam}/D_{pl} = 0,50$. (Fonte: Thomé, 1999)	126
Figura 50 – Superfícies de rupturas das camadas melhoradas: a) $H/D = 1,00$; b) $H/D = 2,00$. (Fonte: Thomé, 1999)	126
Figura 51 – a) visão geral após ensaio de carregamento; b) a visão lateral apresenta o mecanismo de ruptura na camada melhorada com dimensões $900 \times 900 \times 300$ mm (Largura, Comprimento e espessura), cuja falha foi abaixo da placa de aço carregada verticalmente. (Fonte: Consoli <i>et al.</i> , 2019)	128
Figura 52 – Possíveis modos de falha de colunas granulares embutidas no solo submetidas a um carregamento vertical: a) ruptura generalizada no topo da coluna granular; b) ruptura abaulamento; c) ruptura por deslocamento. (Fonte: Traduzido de Madhav e Vitkar, 1978) .	129
Figura 53 – Modos de falha de coluna granular em grupo: a) Antes de romper; b) Após romper. (Fonte: Harish <i>et al.</i> , 2016)	130
Figura 54 – Puncionamento da camada superior. (Fonte: adaptado de Vesic, 1975)	132
Figura 55 – Modelo analítico de capacidade de carga de colunas granulares geradas por substituição dinâmica. (Fonte: Madhav e Viktar, 1978)	133
Figura 56 – Fator de capacidade de carga de colunas granulares para variadas faixas de ângulo de atrito do solo: a) N_c vs D_{cam}/B_{cam} ($C_t/C_s = 0$); b) N_c vs D_i/B_f ($C_t/C_s = 1$); c) N_γ vs D_i/B_f para casos de $\gamma_t/\gamma_s = 1$; c) N_q vs D_i/B_f . (Fonte: Madhav e Vitkar, 1978)	134
Figura 57 – Ábaco para obtenção da carga de ruptura de fundações apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a camada superior foi artificialmente cimentada, para recalques relativos de 3%. (Fonte: Modificado de Faro e Consoli, 2014)	135
Figura 58 – Analogia dos esforços da camada melhorada em função do modelo isostático de viga biapoiada. (Fonte: Foppa, 2016)	136
Figura 59 – Modelo de tensões em bloco de seção plena (camada melhorada espessa). (Fonte: Foppa, 2016)	136
Figura 60 – Ilustração de inclinômetros comerciais: a) <i>Digitilt Classic</i> ®; b) <i>Digitilt AT</i> ®. (Fonte: Slope Indicator, 2019)	142
Figura 61 – Ilustração de outros inclinômetros comerciais: a) <i>GK-604D</i> (Fonte: Geokon, 2019); b) <i>EAN-26M</i> (Fonte: Encardiorite, 2016); c) <i>i6 INC 500</i> . (Fonte: Geodaq, 2014)	143
Figura 62 – Princípio de funcionamento do inclinômetro. (Fonte: adaptado de Atomosybits, 2019)	146
Figura 63 – Princípio de funcionamento do sensor <i>MEMS</i> . (Fonte: Mouser Brasil, 2019) ...	147
Figura 64 – Ilustração do modelo do tubo-guia da <i>Geokon</i> ®: a) Modelo com quatro ranhuras; b) Montagem da junta e proteção com fita adesiva. (Fonte: Geokon, 2019)	147
Figura 65 – Ilustração do modelo de tubo-guia da <i>Slope IndicatorCo</i> ®. a) Modelo <i>QC (Quick Connect)</i> ; b) Modelo padrão (<i>Standard</i>); c) Modelo <i>EPIC</i> . (Slope Indicator, 2019)	149

Figura 66 – Desenho esquemático da sonda inclinométrica: a) vista lateral; b) vista superior. (Fonte: De Souza <i>et al.</i> , 2016).....	152
Figura 67 – Desenho esquemático do procedimento de leitura: a) detalhe da sonda inserida no tubo; b) leitura do inclinômetro em toda extensão do tubo. (Fonte: Adaptado de Dunicliff, 1988)	153
Figura 68 – Desenho esquemático da ocorrência de erro de rotação em inclinômetros. (Fonte: adaptado de Mikkelsen, 2003).....	155
Figura 69 – Desenho esquemático da ocorrência de erro de posição em profundidade: a) posicionamento da sonda; b) deslocamento refletido. (Fonte: adaptado de Mikkelsen, 2003)	156
Figura 70 – Torpedo inclinômetro: a) transdutor com a base móvel; b) detalhe do sensor de efeito <i>hall</i> . (Fonte: Formoso, 1999).....	157
Figura 71 – Torpedo inclinômetro. a) Detalhe em seção longitudinal da sonda; b) sonda construída. (Fonte: Formoso, 1999)	158
Figura 72 – Sonda SADI. (Fonte: Penz, 2013).....	159
Figura 73 – Operação da placa FDC. (Fonte: Penz, 2013).....	159
Figura 74 – Vigas de inclinação. (Fonte: Covassi <i>et al.</i> , 2018).....	159
Figura 75 – Ilustrações do módulo de inclinômetro eletrônico MEMS: a) Vista superior; b) vista inferior; c) fotografia do sensor final. (Fonte: Covassi <i>et al.</i> , 2018).....	160
Figura 76 – Aplicações das vigas de inclinação em obras de escavação: a) obras subterrâneas; b) túneis. (Fonte: Covassi <i>et al.</i> , 2018).....	160
Figura 77 – Fluxograma da pesquisa experimental. (Fonte: Própria, 2021)	161
Figura 78 – Microscopia de varredura realizada na areia de Osório/RS: a) Imagem ampliada a 40 vezes; b) Imagem ampliada 500 vezes. (Fonte: Dalla Rosa, 2019).....	165
Figura 79 – Areia de Osório/RS: a) visão macroscópica do material; b) visão microscópica do material. (Fonte: Própria, 2020)	165
Figura 80 – Comparação das curvas granulométricas da areia de Osório/RS obtidas em laboratório por Ruver (2011), Cruz (2008) e o presente estudo. (Fonte: Própria, 2021)	166
Figura 81 – Ensaios triaxiais CID realizados na areia de Osório/RS com σ_3 de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa: a) Avaliação da tensão tensões em função da deformação transversal; b) Avaliação da deformação volumétrica em função da deformação transversal. (Fonte: Festugato, 2008)	167
Figura 82 – Resistência mecânica da Areia de Osório/RS artificialmente cimentada com cimento CP V ARI RS: a) Curva normalizada q_u vs η/C_{iv} ; b) Curva normalizada q_t vs η/C_{iv} . (Fonte: Consoli <i>et al.</i> , 2010).....	168
Figura 83 – Comportamento da areia de Osório/RS no ensaio triaxial CID: a) tensão desviadora vs deformação cisalhante; b) deformação volumétrica vs deformação cisalhante. (Fonte: Heineck <i>et al.</i> , 2005).....	169
Figura 84 – Ilustração do conjunto gatilho da pesquisa. (Fonte: Própria, 2019).....	171
Figura 85 – Corpos de prova do Aço SAE 4140: a) Corpos de prova de ensaio de tração direta; b) Corpos de prova de ensaio de resistência ao impacto. (Fonte: Própria, 2019)	173
Figura 86 – Equipamentos utilizados para realização dos ensaios: a) prensa eletrônica de ensaio de tração direta; b) equipamento de ensaio de impacto; c) equipamento de ensaio de dureza. (Fonte: Própria, 2019)	174
Figura 87 – Modelagem computacional do gatilho (trigger): a) imagem em 3D do modelo (<i>trigger</i> e manilha); b) Malha adotada (MEF) no corpo do gatilho. (Fonte: Própria, 2019) ..	175
Figura 88 – Simulação numérica do gatilho (<i>trigger</i>): a) avaliação de tensão no corpo; b) avaliação deformação do corpo. (Fonte: Própria, 2019)	176
Figura 89 – Simulação numérica do gatilho: a) avaliação de deslocamento; b) avaliação do FS. (Fonte: Própria, 2019)	177

Figura 90 – Extensômetros coláveis de resistência elétrica (modelo roseta dupla a 90°): a) desenho esquemático; b) extensômetro PA 09 060TG 350 L. (Fonte: Própria, 2019)	177
Figura 91 – Ensaio de tração direta: a) corpo do gatilho fixado na prensa; b) instalação do extensômetro (<i>Strain Gauge</i>) no corpo do gatilho; c) ensaio montado para leitura de deformação no gatilho. (Fonte: Própria, 2019)	178
Figura 92 – Conexão elétrica do acelerômetro <i>MEMS</i> modelo <i>SCA 103T D04-1</i> : (a) esquema do circuito; (b) comportamento das saídas. (Fonte: Murata, 2019).....	180
Figura 93 – Comportamento da saída analógica da <i>SCA 103T D04-1</i> . (Fonte: Murata, 2019)	180
Figura 94 – Corpo da sonda inclinométrica: a) detalhe das peças usinadas já soldadas; b) detalhe do prensa cabo para passagem do cabo de alimentação e leitura; c) Sonda inclinométrica com o circuito eletrônico e adaptador <i>USB</i> para acesso em <i>notebook</i> . (Fonte: Própria, 2021).....	182
Figura 95 – Componentes eletrônicos do inclinômetro: a) Placa <i>Raspberry Pi zero W</i> ; b) Sensor inclinômetro <i>MEMS SCA 103T D04-1</i> ; c) Módulo <i>RS-485</i> ; (d) Módulo <i>USB-TTL</i> ; (e) Regulador de tensão; (f) Módulo <i>ADS-1115</i> ; g) Cabo de comunicação. (Fonte: Própria, 2021)	183
Figura 96 – Diagramação do circuito elétrico do inclinômetro: a) detalhe do circuito principal; b) circuito secundário para conectar circuito principal com o <i>notebook</i> ; c) detalhe do regulador de tensão <i>Step-Up</i> . (Fonte: Própria, 2021)	184
Figura 97 – Programa inclinômetro. <i>py</i> em funcionamento. (Fonte: Própria, 2021)	186
Figura 98 – Construção do circuito eletrônico do inclinômetro: a) Detalhe dos inclinômetros instalados na base; b) detalhe do circuito eletrônico da leitura. (Fonte: Própria, 2021)	187
Figura 99 – Inclinômetro UFRGS: a) <i>black-box</i> de comunicação; b) sonda ou torperdo inclinométrico; c) componentes constituintes do sistema inclinométrico. (Fonte: Própria, 2021)	187
Figura 100 – Localização dos estudos no campo experimental da Universidade de Passo Fundo/RS. (Fonte: Própria, 2021)	188
Figura 101 – Solo laterítico do campo experimental de Passo Fundo/RS: a) Vista (Fonte: Modificado de Faro, 2014); b) Perfil estratigráfico do solo. (Fonte: Própria, 2020)	189
Figura 102 – Mapa Geológico do estado do Rio Grande do Sul. (Fonte: CPRM, 2019).....	190
Figura 103 – Resultados de ensaios de SPT (<i>Standard Penetration Test</i>) no solo do campo experimental: a) com circulação de água; b) sem circulação de água e com uso de trado mecânico. (Fonte: Lopes Jr. e Thomé, 2005)	191
Figura 104 – Resultados de ensaios CPT e DMT realizados no solo de Passo Fundo/RS: a) q_c vs H_s ; b) f_s vs H_s ; c) R_f vs H_s ; d) P_s , P_f e U_o vs H_s ; e) K_o vs H_s . (Fonte: Faro, 2014)	192
Figura 105 – Avaliação das propriedades e parâmetros geotécnicos ao longo de 5m de profundidade: a) teor de umidade natural; b) peso específico real dos grãos; c) limite de liquidez e limite de plasticidade. (Fonte: Dalla Rosa <i>et al.</i> , 2004).....	193
Figura 106 – Análise granulométrica do solo laterítico de Passo Fundo/RS: a) com e sem sedimentação (Fonte: Ruver, 2011); b) distribuição ao longo de 5m de profundidade. (Fonte: Dalla Rosa <i>et al.</i> , 2004)	194
Figura 107 – Classificação do solo laterítico de Passo Fundo/RS a partir da sistemática M.C.T. (Fonte: Souza Junior <i>et al.</i> , 2019).....	195
Figura 108 – Trajetórias de tensões (CID) do solo de Passo Fundo/RS: a) σ_3 de 20 kPa, 60 kPa e 100 kPa (Fonte: Donato, 2005); b) σ_3 de 20 kPa, 35 kPa e 50 kPa. (Fonte: Carretta, 2018)	196
Figura 109 – Comportamento q vs ξ_{axial} (%) do solo de Passo Fundo/RS através do ensaio tipo CID: a) σ_3 de 20 kPa, 60 kPa e 100 kPa (Fonte: Donato, 2005); b) σ_3 de 20 kPa, 35 kPa e 50 kPa. (Fonte: Carretta, 2018)	197
Figura 110 – Locação das estacas no campo experimental da Universidade de Passo Fundo/RS: a) Disposição das estacas; b) Detalhe da identificação da estaca. (Fonte: Própria, 2020)	197

Figura 111 – Conjuntos de liberação do martelo de compactação: a) vista do gatilho, laço e as manilhas; b) vista lateral do gatilho. (Fonte: Própria, 2019).....	199
Figura 112 – Conjuntos de liberação do martelo de compactação alterado: a) Vista do gatilho, laço e as manilhas; b) Vista lateral do gatilho. (Fonte: Própria, 2019)	199
Figura 113 – Procedimento operacional de montagem do gatilho: a) Introdução da manilha metálica no corpo; b) Travamento do gatilho (levantamento da alavanca); c) Fixação dos cabos de aço nas bordas do martelo; d) Preparação para içamento da peça. (Fonte: Própria, 2020).....	200
Figura 114 – Sistema de compactação dinâmica utilizado no estudo: a) equipamento de guindaste utilizado; b) detalhe do gatilho fixado ao guindaste com o martelo acoplado. (Fonte: Própria, 2020).....	201
Figura 115 – Martelo de compactação utilizado no estudo: a) martelo de compactação; b) dimensões geométricas da peça. (Fonte: Rizzon, 2016).....	201
Figura 116 – Procedimento de preenchimento de cratera: a) Carrinho de mão sendo preenchido e nivelado; b) carrinho de mão preenchido; c) cratera em fase de preenchimento; d) espalhamento do material na cratera. (Fonte: Própria, 2020).....	202
Figura 117 – Colunas granulares de DR: a) disposição das colunas granulares; b) Aspecto visual da coluna granular. (Fonte: Própria, 2020).....	203
Figura 118 – Funcionamento do programa <i>Tracker</i> ®. (Fonte: Própria, 2020).....	203
Figura 119 – Equipamento sismógrafo: a) <i>Recorder</i> ; b) sensor de velocidade. (Fonte: Geosig, 2020).....	204
Figura 120 – Equipamento sismógrafo instalado no campo: a) <i>Recorder</i> instalado no <i>notebook</i> ; b) detalhe do sensor de velocidade no campo; c) sensor de velocidade locado. (Fonte: Própria, 2020).....	205
Figura 121 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular (L=1000 mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021)	208
Figura 122 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular (L = 2000 mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021)	209
Figura 123 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular (L = 850 mm) com camada melhorada ($H_{cam} = 150$ mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021).....	210
Figura 124 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular (L = 500 mm) com camada melhorada ($H_{cam} = 500$ mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021).....	211
Figura 125 – Estudo comparativo entre as colunas estudadas. (Fonte: Própria, 2021).....	211
Figura 126 – Avaliação comparativa da capacidade de carga do solo melhorado submetido a diferentes espessuras de colunas e espessuras das camadas considerando o critério de ruptura $\delta_{DV}/D_{pl}=3\%$. (Fonte: Própria, 2021)	212
Figura 127 – Mistura e controle da camada melhorada em campo: a) Mistura e homogeneização na bentoneira; b) controle do teor de umidade; c) amostras no microondas. (Fonte: Própria, 2021).....	213
Figura 128 – Construção da camada melhorada em campo: a) Introdução e nivelamento da camada; b) Camada de 500 mcm executada; c) Camada de 150 mm executada. (Fonte: Própria, 2021).....	214
Figura 129 – Sistema de pórtico de reação com detalhamento do macaco hidráulico. (Fonte: Própria, 2021)	214
Figura 130 – Sistema de aquisição de leituras do ensaio de placa. (Fonte: Própria, 2021)....	215

Figura 131 – Calibração da célula de carga. (Fonte: Própria, 2021).....	216
Figura 132 – Gráficos de calibração das réguas potenciométricas: a) Transdutor linear 1; b) Transdutor linear 2; c) Transdutor linear 5; e d) Transdutor linear 6. (Fonte: Própria, 2021).....	217
Figura 133 – Equipamentos do ensaio de placa montados: a) Sistema aquisitor + <i>Notebook</i> ; b) transdutores lineares montados e referenciados. (Fonte: Própria, 2021).	217
Figura 134 – Ensaio de sucção: a) amostras de papel filtro separadas por camada; b) amostras sendo pesadas. (Fonte: Própria, 2021).....	218
Figura 135 – Extração de testemunhos da camada melhorada: a) material da camada melhorada de 150 mm rompida; b) corpos de prova embalados para ensaios triaxiais CID e corpos de prova em fase de saturação para ensaio de compressão não confinada. (Fonte: Própria, 2021)	219
Figura 136 – Ensaio Triaxial CID da Areia de Osório: a) Forma de moldagem do cp; b) cp moldado na bancada; c) Ensaio montado (câmara + prensa). (Fonte: Própria, 2021).....	219
Figura 137 – Atividades de exumação das colunas granulares: a) escavação do solo; b) abertura da vala; c) extração de amostras indeformadas com cilindro cortante. (Fonte: Própria, 2021)	220
Figura 138 – Procedimentos executivos do ensaio SPT nas colunas granulares: a) escavação do furo; b) introdução do amostrador na cota de ensaio; c) e material coletado pelo amostrador. (Fonte: Própria, 2021)	221
Figura 139 – Coleta de amostra indeformada do solo laterítico de Passo Fundo/RS: a) coleta do material abaixo da coluna; b) material coletado. (Fonte: Própria, 2021)	222
Figura 140 – Modelo numérico axissimétrico 2D exemplo utilizado na avaliação do comportamento do solo: a) Vista transversal do modelo; b) detalhe do refinamento da malha de MEF. (Fonte: Própria, 2021)	223
Figura 141 – Ensaio de resistência à tração direta dos corpos de prova do aço SAE 4140. (Fonte: Própria, 2019)	224
Figura 142 – Ensaio de tração direta do gatilho com as manilhas acopladas. (Fonte: Própria, 2019).....	225
Figura 143 – Deformações elásticas sofridas pelo gatilho em ensaio de carregamento estático. (Fonte: Própria, 2019)	226
Figura 144 – Respostas do impacto do martelo: a) Variação da altura de queda em relação ao tempo; b) Variação da velocidade em relação ao tempo. (Fonte: Própria, 2020)	227
Figura 145 – Respostas do impacto do martelo: a) Desaceleração do martelo em contato com o solo em relação ao tempo; b) Força de impacto em relação ao tempo. (Fonte: Própria, 2020)	227
Figura 146 – Subsidiência induzida provocado pelos golpes de martelo de 55 kN: a) D_c vs G_m ; b) Tendência comportamental da evolução da cratera. (Fonte: Própria, 2020).....	228
Figura 147 – Medidas de teor de umidade da areia por pontos de estudos (PEs). (Fonte: Própria, 2020).....	229
Figura 148 – Relação entre a Energia acumulada de compactação vs volume da coluna granular. (Fonte: Própria, 2020)	230
Figura 149 – Relação entre γ_d (kN/m ³) e D_R (%) na Areia de Osório/RS para energia Proctor Normal. (Fonte: Própria, 2021)	230
Figura 150 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 3 m de altura medidas à 2,6 m de distância do eixo da fonte em 1º golpe: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	232
Figura 151 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 3 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte em 1º golpe: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	233

Figura 152 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 3 m de altura medidas à 6,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	234
Figura 153 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 5 m de altura medidas à 2,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	235
Figura 154 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 5 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	236
Figura 155 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 5 m de altura medidas à 6,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	237
Figura 156 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 8 m de altura medidas à 2,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	238
Figura 157 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 8 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	239
Figura 158 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 8 m de altura medidas à 6,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	240
Figura 159 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 8 m de alturas medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte com 7 golpes seguidos: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)	241
Figura 160 – Gráfico normalizado de <i>PPVs</i> obtidos no campo experimental (Fonte: Própria, 2021).....	242
Figura 161 – Estudo comparativo entre curvas normalizadas de <i>PPV</i> obtidas por diversos trabalhos e a proposta. (Fonte: Própria, 2021)	243
Figura 162 – Resultados dos ensaios de placa realizados, em termos de $P(kN)$ vs δ_{DV} (mm) com o dado de Dalla Rosa (2004). (Fonte: Própria, 2021).....	244
Figura 163 – Resultados dos ensaios de placa realizados, em termos de $\sigma_{pl}(kN)$ vs δ_{DV}/D_{pl} (%) com o dado de Dalla Rosa (2004). (Fonte: Própria, 2021).....	245
Figura 164 – Resumo dos valores das cargas aplicadas nos ensaios de placa considerando $\delta_{DV}/D_{pl}=3\%$ com adição do ensaio de Dalla Rosa (2004). (Fonte: Própria, 2021)	246
Figura 165 – Estudo comparativo entre os ensaios de placa da pesquisa conjuntamente com os dados de Dalla Rosa (2004) e Giese (2019). (Fonte: Própria, 2021)	247
Figura 166 – Ensaio de placa realizado no topo do solo natural do campo experimental de Passo Fundo/RS: a) Vista Lateral; b) Vista superior; c) Vista Frontal. (Fonte: Própria, 2021)	248
Figura 167 – Ruptura da camada melhorada do PE-I ($H_{cam} = 500$ mm): a) Vista superior do afundamento da placa; b) formação de um tronco de cone na zona carregada; c) Vista em corte da camada melhorada rompida. (Fonte: Própria, 2021)	248
Figura 168 – Ruptura da camada melhorada do PE-VI: a) Camada melhorada plastificada; b) vista lateral da camada; c) aspecto do material internamente. (Fonte: Própria, 2021).....	249
Figura 169 – Ruptura da camada melhorada do PE-V: a) diagramação da ruptura; b) Proliferação das fissuras até o bordo da placa; c) Formação do cone de densificação na ruptura. (Fonte: Própria, 2021)	250
Figura 170 – Ruptura da camada melhorada do PE-II: a) Detalhe do afundamento da placa e diagramação das fissuras e trincas; b) Detalhe da formação do tronco de cone; c) Detalhe da espessura da camada. (Fonte: Própria, 2021)	250

Figura 171 – Ruptura do PE-III: a) Detalhe do afundamento da placa na superfície após o ensaio; b) Detalhe da formação da trinca ao entorno da placa após o ensaio. (Fonte: Própria, 2021).....	251
Figura 172 – Ruptura do solo do PE-IV (sem Camada): a) Detalhe do afundamento da placa na superfície e formação das trincas superficiais após o ensaio; b) Detalhe do prolongamento da trinca do centro a periferia da coluna. (Fonte: Própria, 2021).....	252
Figura 173 – Exumação do PE - III: a) corte transversal da coluna; b) detalhe do trecho do afundamento da coluna. (Fonte: Própria, 2021)	255
Figura 174 – Exumação do PE-IV: a) corte transversal do PE-IV com detalhe do material sólido-fluido na base; b) detalhe do material de base. (Fonte: Própria, 2021).....	256
Figura 175 – Avaliação de índice de vazios em função da profundidade da coluna granular : a) PE - III; b) PE -IV . (Fonte: Própria, 2021).....	257
Figura 176 – Avaliação da densidade relativa em função da profundidade da coluna granular: a) PE -III; b) PE -IV. (Fonte: Própria, 2021)	257
Figura 177 – Relação entre q vs ξ_{axial} do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,88$. (Fonte: Própria, 2021)	259
Figura 178 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,88$. (Fonte: Própria, 2021)	260
Figura 179 – Envoltória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,88$. (Fonte: Própria, 2021).....	260
Figura 180 – Avaliação prática de deposição do material: a) Forma de CBR preenchida; b) material despejado; c) Medição do ângulo de deposição com o app. (Fonte: Própria, 2021)	261
Figura 181 – Relação entre q vs ξ_{axial} do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,77$. (Fonte: Própria, 2021)	262
Figura 182 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,77$. (Fonte: Própria, 2021)	262
Figura 183 – Envoltória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,77$. (Fonte: Própria, 2021).....	263
Figura 184 – Relação entre índice de vazios e o φ' da areia de Osório/RS. (Fonte: Própria, 2021)	263
Figura 185 – Rupturas dos cps da areia de Osório/RS após o ensaio triaxial CID com $e_o = 0,77$: a) $\sigma_3 = 20$ kPa; b) $\sigma_3 = 50$ kPa; b) $\sigma_3 = 80$ kPa. (Fonte: Própria, 2021).....	264
Figura 186 – Relação entre q vs ξ_{axial} do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)	265
Figura 187 – Relação entre ΔV vs ξ_{axial} do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)	266
Figura 188 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)	266
Figura 189 – Envoltória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)	267
Figura 190 – Relação entre a tensão desviadora vs deformação axial do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)	268
Figura 191 – Relação entre ΔV vs ξ_{axial} do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)	269
Figura 192 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)	269
Figura 193 – Envoltória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)	270
Figura 194 – Rupturas dos cps da camada melhorada após o ensaio triaxial CID do PE-VI : a) $\sigma_3 = 20$ kPa; b) $\sigma_3 = 50$ kPa; c) $\sigma_3 = 80$ kPa. (Fonte: Própria, 2021)	270

Figura 195 – Ensaio de <i>SPT</i> realizados no centro das colunas granulares: a) PE - I; b) PE – II; c) PE-V; d) PE-VI. (Fonte: Própria, 2021).....	272
Figura 196 – Avaliação das amostras indeformadas do solo laterítico densificado abaixo da coluna granular em relação das curvas de compactação. (Fonte: Própria, 2021).....	274
Figura 197 – Avaliação comparativa das amostras indeformadas do solo laterítico de Passo Fundo/RS submetido à compactação dinâmica. (Fonte: Própria, 2021)	274
Figura 198 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-I. (Fonte: Própria, 2021)	276
Figura 199 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)	277
Figura 200 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-VI: a) concentração de tensões na região abaixo da placa; b) Regiões plastificadas da camada melhorada. (Fonte: Própria, 2021).....	277
Figura 201 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-II. (Fonte: Própria, 2021).....	278
Figura 202 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-II: a) concentração de tensões na região abaixo da placa; b) Regiões plastificadas da camada melhorada. (Fonte: Própria, 2021)	279
Figura 203 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-V. (Fonte: Própria, 2021).....	279
Figura 204 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-III. (Fonte: Própria, 2021).....	280
Figura 205 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-III: a) Cunha de deslocamento total; b) Cunha de plastificação. (Fonte: Própria, 2021).....	280
Figura 206 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-IV. (Fonte: Própria, 2021)	281
Figura 207 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-IV: a) Cunha de deslocamento vertical; b) Bulbo de tensões verticais. (Fonte: Própria, 2021)	281
Figura 208 – Avaliação carga de ruptura do PE-III e do PE-IV em relação a respostas do método teórico de capacidade de carga de Terzaghi (1943): a) curva σ_{pl} vs D_{pl}/D_f ; b) P vs D_{pl}/D_f . (Fonte: Própria, 2021)	282
Figura 209 – Procedimentos de calibração da sonda inclinométrica: a) momento da medição; b) desenvolvimento dos cilindros virtuais; c) comparação das medidas com a leitura digital. (Fonte: Própria, 2021)	284
Figura 210 – Gráfico de calibração do sensor <i>MEMS</i> S1. (Fonte: Própria, 2021)	285
Figura 211 – Calibração do sensor <i>MEMS</i> S2: a) Direção principal; b) Direção perpendicular a principal. (Fonte: Própria, 2021)	285
Figura 212 – Tubo-guia utilizado na validação da sonda inclinométrica proposta: a) distorção do tubo-guia no sentido Y; b) distorção do tubo-guia no sentido X; c) detalhe da introdução da sonda comercial no tubo-guia. (Fonte: Própria, 2021)	286
Figura 213 – Estruturas das sondas inclinométricas utilizadas: a) <i>Digitilt Datamate II</i> ; b) Sonda experimental proposta já acoplada no <i>notebook</i> . (Fonte: Própria, 2021)	287
Figura 214 – Resultados dos deslocamento horizontais medidos com a sonda comercial <i>Digitilt Datamate II</i> : a) medida na direção X; b) medida na direção Y. (Fonte: Própria, 2021)	288
Figura 215 – Resultados dos deslocamento horizontais medidos com a sonda experimental UFRGS proposta: a) medida na direção X; b) medida na direção Y. (Fonte: Própria, 2021)	288

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de equações de profundidade de melhoria do solo desenvolvidas por diversos pesquisadores. (Fonte: Própria, 2020).....	64
Tabela 2 – Valores de coeficientes empíricos η obtidos por diversos autores em diversos sites pelo mundo (Fonte: Própria, 2021)	65
Tabela 3 – Valores de resistência ao cisalhamento por tipo de solo medidos após a compactação dinâmica (Fonte:Lukas,1995).....	70
Tabela 4 – Equações empíricas usadas para previsão de <i>PPV</i> . (Fonte: Própria, 2020).....	89
Tabela 5 – Limites de velocidade de pico de partículas em relação ao tipo de dano. (Fonte: Slocombe, 2013).....	91
Tabela 6 – Critérios de velocidade de pico de partículas por tipos de estruturas. (Fonte: Lauzon <i>et al.</i> , 2011).....	92
Tabela 7 – Critério limite de frequências de vibrações da Austrália segundo a CA- 23 1967. (Fonte: Just e Chitombo, 1987)	94
Tabela 8 – Especificações de peso e cabos em função do porte do equipamento. (Fonte: Lukas,1995).....	104
Tabela 9 – Fatores de forma (Fonte: Hansen, 1961)	131
Tabela 10 – Faixa de valores de parâmetros que podem ser adotados. (Fonte: Thomé, 1999)	135
Tabela 11 – Relação de modelos de inclinômetros com servo-acelerômetros desenvolvidos por vários fabricantes. (Fonte: Silveira, 2006)	141
Tabela 12 – Relação dos inclinômetros mais desenvolvidos. (Fonte: Silveira, 2006).....	142
Tabela 13 – Matriz de variáveis envolvidas nas pesquisas de campo. (Fonte: Própria, 2019)	162
Tabela 14 – Matriz de ensaios de campo. (Fonte: Própria, 2021).....	162
Tabela 15 – Matriz de ensaios de laboratório das amostras de solos e ensaios de campo. (Fonte: Própria, 2021).....	163
Tabela 16 – Matriz de ensaios de medição de vibração. (Fonte: Própria, 2020).....	163
Tabela 17 – Comparação de Índices físicos da Areia de Osório/RS obtidos em laboratório com os resultados de Cruz (2008). (Fonte: Própria, 2021)	166
Tabela 18 – Relação de ensaios triaxiais realizados com areia de Osório/RS (Fonte: Adaptado de Corte, 2016)	168
Tabela 19 – Composição química dos aços utilizados no gatilho. (Fonte: NBR NM 87, 2000)	172
Tabela 20 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados na concepção do gatilho. (Fonte: Solidworks,2017).....	173
Tabela 21 – Teste de convergência da malha no gatilho. (Fonte: Própria, 2019)	175
Tabela 22 – Parâmetros do acelerômetro <i>MEMS</i> modelo SCA 103T D04-1 (Fonte: Murata, 2019).....	179
Tabela 23 – Componentes do inclinômetro experimental proposto. (Fonte: Própria, 2021) .	186
Tabela 24 – Comparação entre os estudos das propriedades físicas dos solos laterítico argiloso de Passo Fundo/RS. (Fonte: Própria, 2018)	193
Tabela 25 – Parâmetros considerados para avaliação das espessuras das colunas granulares. (Fonte: Própria, 2021)	206
Tabela 26 – Parâmetros considerados para avaliação das espessuras das camadas melhoradas. (Fonte: Própria, 2021)	207
Tabela 27 – Resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova do aço SAE 4140 (Fonte: Própria, 2019).....	224

Tabela 28 – Resultados dos ensaios de compressão não confinada dos testemunhos extrudados das camadas melhoradas. (Fonte: Própria, 2021)	253
Tabela 29 – Resultados dos ensaios de sucção mátrica obtidos pelo método do papel filtro. (Fonte: Própria, 2021)	254
Tabela 30 – Dados das amostras da areia de Osório/RS. (Fonte: Própria, 2021).....	259
Tabela 31 – Resultados das amostras indeformadas do solo laterítico compactado dinamicamente. (Fonte: Própria, 2021)	273
Tabela 32 – Parâmetros adotados para a validação numérica dos PE-III e PE-IV. (Fonte: Própria, 2021)	275
Tabela 33 – Parâmetros adotados para a validação numérica dos PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)	275

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de rotação do sensor inclinômetro SCA 103T DO4-1 (-15° até 15°)
a_z	Coefficiente angular de profundidade
b_z	Coefficiente linear de profundidade
a_R	Coefficiente angular do raio
b_R	Coefficiente linear do raio
α_d	Razão de densidade
α_s	Fator de eficiência solo
β	Ângulo que a face inclinada do bloco faz com a horizontal
β_{in}	Exatidão do equipamento
β_c	Ângulo de influência.
Δ_{error}	Ângulo do erro de rotação
Δ_{desvio}	Deslocamento induzido ao eixo perpendicular ao sentido do deslocamento
$\Delta\varphi$	Varição do ângulo de atrito do solo
$\Delta\varphi_b$	Varição do ângulo de atrito da base do martelo
$\Delta\varphi_m$	Varição do ângulo de atrito em um ponto intermediário
Δ_H	deslocamento horizontal medido com base no sensor calibrado
Δt	Varição temporal
Δv	Varição volumétrica
θ	Ângulo de inclinação do sensor inclinômetro <i>MEMS</i> em relação à posição 0g
θ_c	Ângulo de rotação de compactação
\varnothing_{ext}	Diâmetro externo do tubo-guia
\varnothing_{int}	Diâmetro interno do tubo-guia
\varnothing_{luva}	Diâmetro da luva do tubo-guia
$\xi_{axial} (\%)$	Deformação axial
γ	Peso específico do solo
γ_g	Peso específico real dos grãos
γ_t	Peso específico natural do material da coluna
γ_s	Peso específico natural do solo circundante
γ_d	Peso específico do solo seco
ξ	Eficiência da queda
φ'	Ângulo de atrito interno efetivo
φ'_1	Ângulo de atrito efetivo do solo cimentado

φ'_2	Ângulo de atrito efetivo do solo não cimentado
ρ_d	Densidade do material seco
ρ_{max}	Densidade máxima do solo
$\rho(\zeta)$	Deslocamento horizontal qualquer
$\rho(1)$	Deslocamento horizontal inicial
$\rho(2)$	Deslocamento horizontal final
σ_1	Tensão axial
σ_3	Tensão confinante
σ_e	Tensão vertical no limite de elasticidade
σ_{pl}	Tensão vertical na placa
$\sigma_{t,máx}$	Tensão de tração máxima sofrida no reforço
δ_{DV}	Deslocamento vertical
δ_{DH}	Deslocamento horizontal
δ_{DHT}	Deslocamento horizontal total (do topo em relação a extremidade fixa)
$\delta_{máx}$	Deslocamento máximo
η	Porosidade
η_{DC}	Coefficiente empírico
η_r	Fator de redução de energia do golpe (V_i^2/V_o^2)
η_p	Coefficiente de compressão
Ψ	Parâmetro de estado
λ	Comprimento de onda
λ_{in}	Resolução do equipamento
ν	Coefficiente de Poisson
$\{\alpha\}$	Matriz de aceleração
$\{d\}$	Matriz de deslocamentos
$\{C\}$	Matriz de amortecimento
$\{F\}$	Vetor de forças discretas ou nodais induzidas pelo estado de tensões internas;
$\{K\}$	Matriz de rigidez
$\{M\}$	Matriz de massa
$\{P\}$	Vetor do corpo e das forças aplicadas
$\{v'\}$	Matriz de Velocidade
γ_a e β_a	Parâmetros de estabilidade e acurácia do algoritmo
A	Área de contato

a_w	Aceleração da onda
$a(t)$	Desaceleração do corpo após o contato até estabilizar a deformação
B_f	Largura da base da fundação
B_{cam}	Largura da camada melhorada
c'	Intercepto coesivo efetivo
c'_1	Intercepto coesivo efetivo do solo cimentado ou rígido;
c'_2	Intercepto coesivo efetivo do solo não cimentado
c_e	Fator de eficiência do equipamento
cp	Corpo-de-prova
C_c	Coefficiente de curvatura
C_u	Coefficiente de uniformidade
C_s	Intercepto coesivo do solo circundante
C_t	Intercepto coesivo do material da coluna
CTC	Capacidade de troca catiônica
$C\%$	Teor de cimento
$C_{iv} \%$	Teor volumétrico de cimento
CSW	Método da onda de superfície contínua técnica
d_{cr}	Diâmetro da cratera
d_c	Fator de profundidade com base na coesão
d_q	Fator de profundidade com base na sobrecarga
d_γ	Fator de profundidade com base no ângulo de atrito
D	Profundidade de melhoria
D_{10}	Diâmetro efetivo
D_{50}	Diâmetro médio
D_m	Diâmetro do martelo
D_c	Profundidade da cratera
D_f	Profundidade de assentamento da fundação
DI	Profundidade de influência líquida ou efetiva (descontando a cratera)
D_p	Profundidade efetiva de penetração
D_{pl}	Diâmetro da Placa
D_r	Densidade Relativa
D_t	Diâmetro da coluna
D_w	Distância da fonte de vibração
e	índice de vazios

e_{\min}	índice de vazios mínimo
e_{\max}	índice de vazios máximo
E	Energia de impacto
E_d	Energia total
E_{m2}	Módulo de elasticidade do solo não cimentado
E_{Young}	Módulo de elasticidade ou Módulo de Young
f_b	Fator inferior
f_c	Fator de amortecimento
f_m	Fator de solo
F_1, F_2	Fatores parciais de capacidade de carga
F_{gy}	Componente da força gravitacional em relação a vertical
F_{gcc}	Fator global de capacidade de carga
FS	Fator de segurança
F	Frequência da vibração ou da onda
g	Aceleração gravitacional ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
G	Força G
G_m	Golpes do martelo de compactação
G_0	Módulo cisalhante para baixas deformações
G_{din}	Módulo cisalhante dinâmico
H	Altura de queda
H_{cam}	Espessura da camada melhorada com cimento compactada
H_s	Profundidade do solo
i_c	Fator de inclinação de carga com base na coesão
i_q	Fator de inclinação de carga com base na sobrecarga
i_γ	Fator de inclinação de carga com base no ângulo de atrito
ISC	Índice Suporte Califórnia
j e k	Parâmetros de ajuste de curva de regressão linear
l e m	Parâmetros de ajuste de curva de regressão linear
L	Comprimento da coluna granular
L_n	Leitura média do mostrador a qualquer momento n
L_{n-1}	Leitura do indicador de discagem média imediatamente anterior para L_n
L_1	Primeira leitura do estágio de carregamento, tomada logo após o carregamento do aparelho com uma duração mínima de 30 min
L_{eixos}	Distância entre eixos do conjunto de rodas (15 cm para o inclinômetro proposto)

Ls	Comprimento da sonda inclinométrica
L _{tubo}	Comprimento total do tubo
K	Coefficiente de cravação
K ₁	Fator de profundidade
K ₂	Fator de energia
K ₀	Coefficiente de repouso
K _s	Parâmetro adimensional do solo
n	Razão de atenuação de vibração
N	Número de golpes por passe
N _c	Fator de capacidade de carga com base na coesão
N _q	Fator de capacidade de carga com base na sobrecarga
N _γ	Fator de capacidade de carga com base no ângulo de atrito
N _{cs}	Fator de capacidade de carga de coesão do solo circundante
N _{qs}	Fator de capacidade de carga de sobrecarga do solo circundante
N _{γs}	Fator de capacidade de carga do ângulo de atrito do solo circundante
N _{ct}	Fator de capacidade de carga de coesão da coluna granular
N _{qt}	Fator de capacidade de carga de sobrecarga da coluna granular
N _{γt}	Fator de capacidade de carga do ângulo de atrito da coluna granular
M	Massa do martelo
N _{spt}	Número de golpes dos 30 cm finais do ensaio SPT
<i>Offset</i>	Saída do dispositivo na posição de inclinação de 0°
p'	Tensão desviadora
P	Carga vertical aplicada
P _{atm}	Pressão Atmosférica
q	Tensão triaxial média
q _c	Resistência a penetração do cone
q _t	Resistência à tração
q _u	Resistência de compressão não-confinada
q _{ult}	Tensão ou capacidade de carga última na base da coluna
q _o	capacidade de suporte de fundação devido ao carregamento de uma sapata fictícia, de mesmo tamanho da sapata atual, apoiada no topo da camada inferior do solo
Q _{ru(n)}	Carga de ruptura da camada melhorada
R	Raio de influência

R_m	Raio do Martelo
S	Espaçamento dos pontos da grade
S_L	Diferença entre leituras adjacentes
SASW	Método de onda de superfície de análise espectral
SDOF	Sistema de grau único de liberdade visivelmente amortecido
<i>Sensitivity</i>	Sensibilidade do dispositivo
S_c	Fator de forma com base na coesão
S_q	Fator de forma com base na sobrecarga
S_γ	Fator de forma com base no ângulo de atrito
S_m	Sucção mátrica ou matricial
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
S_w	Deslocamento da onda
<i>Tilt</i>	Ângulo de posicionamento do sensor
Tr	Distância da borda da placa a borda da camada melhorada
U	Energia aplicada por unidade de área = $(WH/A) / \text{golpe}$
V_v	Volume absoluto de vazios (água + ar)
V_{ci}	Volume absoluto de cimento
V_{cg}	Volume da coluna granular
V_i	Velocidade de impacto observada
V_o	Velocidade em queda livre
V_{Dout}	Saída do amplificador diferencial
$V_{out\ tilt}$	Tensão de saída do sensor dependendo da posição
V_w	Velocidade da onda
V_x	Velocidade medida em x
V_y	Velocidade medida em y
V_z	Velocidade medida em z
V_r	Velocidade resultante
$V_{x,m\acute{a}x}$	Velocidade máxima medida em x
$V_{y,m\acute{a}x}$	Velocidade máxima medida em y
$V_{z,m\acute{a}x}$	Velocidade máxima medida em z
ω	Teor de umidade do solo
$\bar{\omega}$	Teor de umidade médio
ISC	Índice de Suporte Califórnia

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASME	American Society Mechanical Engineers
BS	British Standard
BSE	Bias Shift Error
CA	Australia Standards
CETEC	Centro Tecnológico de Engenharia Civil
CID	Consolidado isotropicamente e drenado
CPTu	Cone Penetration Test Undrained
CP III	Cimento Portland de alto forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V ARI RS	Cimento Portland de alta resistência inicial/resistente a ataque de sulfatos
dBL	Decibel
DC	Dynamic Compaction
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMT	Dilatometer Marchetti Test
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DPE	Erro de posição de profundidade;
DPS	Deslocamento de posição em profundidade
DR	Dynamic Replacement
FDC	Fonte/Driver/Controle
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GPa	GigaPascal
Hz	Hertz
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HV	High Voltage
KPa	KiloPascal
LD	Leitura Digital do sensor MEMS
LV	Low Voltage
M.C.T	Miniatura, Compacto e Tropical

MEC	Método dos elementos de contorno
MED	Método dos elementos discretos
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MPa	MegaPascal
NBR	Normas Brasileiras
NP	Norma Portuguesa
OCR	Over Consolidation Ratio
Pa	Pascal
PC	Personal Computer
PE	Ponto de estudo
PMT	Pressuremeter Menard Test
PPV	Peak Particle Velocity
PSD	Power Spectral Density
PSO	Algoritmo de otimização de partícula
PUC-PR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
PIV	Particle Image Velocimetry
PSD	Power Spectrum Density
PVC	Policloreto de Polivinila
QC	Quick Connect
RAP	Rammed Aggregate Pile
RIC	Rapid Impact Compaction
SAA	Shape Array
SPT	Standard Penetration Test
SN	Swiss norm
SS	Standard Swedish
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TTL	Time to Live
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNI	Nazionale Italiano Unificazione
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande Sul
UFBA	Universidade Federal da Bahia
USB	Universal Serial Bus

1 INTRODUÇÃO

No contexto da Geotecnia é comum se deparar com uma diversidade de tipos de solos, cujas peculiaridades direcionam a escolha da técnica que deve ser adotada para atender as necessidades da construção civil. Há uma significativa quantidade de variáveis envolvidas, tais como a gênese, propriedades mecânicas, espessura, característica das estruturas, entre outras, que devem ser consideradas na análise técnica e econômica para definição do tipo de fundação. No passado, nas áreas em que os solos apresentavam baixa capacidade de suporte e/ou características muito deformáveis eram enquadradas como áreas inviáveis para a construção. Contudo, o avanço tecno-científico da mecânica dos solos corroborou para o desenvolvimento de conhecimento voltado ao melhoramento dos solos de forma a permitir a execução de construções em solos com condições geológicas e/ou geotécnicas naturalmente impróprias.

Segundo Kédzi (1979), o melhoramento ou reforço de solos é compreendido como alteração e/ou manipulação de processos físicos e/ou químicos que visa modificar as propriedades mecânicas dos solos (resistência ao cisalhamento), compressibilidade e condutividade hidráulica na forma a atender alguma necessidade específica da construção civil. Atualmente, existem várias possibilidades de melhoramento de solos divididas em: técnicas de consolidação (drenos verticais, geodrenos, consolidação à vácuo, pré-carga com aterros, eletrosmose e injeção de compactação), técnicas de reforço por elementos artificiais (colunas de módulo controlado, *Jet grouting*, *Deep soil mixing*, *Cutter soil mixing*, geoenrijecimento e geossintéticos), técnicas de reforço por elementos naturais (substituição dinâmica, vibrosubstituição, vibroflotação, RAP), técnicas de compactação (compactação dinâmica, vibrocompactação e explosões), técnicas de estabilização (introdução de aglomerantes, conglomerantes, geopolímeros, resíduos com fíler e/ou pozolanas e substituição granulométrica), técnicas térmicas (*Freezing* e *Heating*) e outros.

A compactação dinâmica é capaz de gerar uma melhoria significativa a uma profundidade substancial, muitas vezes com considerável economia quando comparada a outras soluções geotécnicas. (SLOCOMBE,2013) Ela se tornou um método popular em todo o mundo endereçada a melhoria profunda de solos fofos nos últimos anos. Do ponto de vista prático, envolve a aplicação repetida de impactos de alta energia na superfície do solo usando martelos de compactação que pesam toneladas, liberados em queda livre ou com cabos em alturas na faixa de metros, compactando os estratos do solo até uma profundidade considerável. (SLOCOMBE, 2013; PAN e SELBY, 2001).

O método é uma alternativa economicamente atraente para a utilização de fundações superficiais e para o melhoramento de propriedades mecânicas dos solos em áreas extensas (FERNANDES, 2011), quando comparadas com soluções convencionais (fundações de estacas, escavação e substituição, sobrecargas, etc). Além disso, a técnica da compactação dinâmica é abrangente no que tange a sua aplicação numa variedade de tipos e condições de solo, principalmente materiais arenosos e aterros granulares, ainda que um número limitado de solos coesivos também tenha sido tratado (MAYNE *et al.*, 1984). Quando aplicados a solos finos e argilas saturadas é necessário cuidado (MITCHEL, 1981). Estes tipos de solos possuem rigidezes menores, conseqüentemente, a compressibilidade do material impede que camadas mais profundas não sejam melhoradas.

Mesmo sendo uma alternativa economicamente e tecnicamente vantajosa, pois sua aplicação é vasta, como em aterros heterogêneos, granulares (areia natural fofa) e depósitos (argilosos e arenosos), o princípio da compactação dinâmica pode ser usado na construção de colunas de material pedregulhosos/ou arenosos como uma alternativa de melhoria conhecida como *Dynamic Replacement* (DR), principalmente em solo mole (argila siltosa ou turfa) como alternativa de reforço. (LAUZON *et al.*, 2011). Em linhas gerais, o DR visa a construção de colunas de reforço que geram uma parcial substituição do solo de baixa capacidade de carga por um solo de natureza friccional. O material de preenchimento compactado permite a criação de colunas resistentes e rígidas, com formatos que dependem da geometria do martelo e da energia de compactação, que além elevar a densidade do solo do entorno e, portanto, modificar os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação médios do solo, ficam assentadas em estratos mais resistentes. Desta forma, ocorre uma melhoria equivalente do solo dependendo do espaçamento e da seção da coluna e do N_{spt} do solo *in loco* e do material da coluna.

Este método tem sido usado para diferentes tipos de projetos de engenharia civil, incluindo estruturas de edifícios, rodovias, aeroportos, instalações de carvão, estaleiros e redução do potencial de liquefação de solos fofos em regiões sismicamente ativas. (MAYNE *et al.*, 1984). Entretanto, é importante salientar que o método desenvolve fortes vibrações e ruídos, o que pode afetar negativamente as construções adjacentes. (FERNANDES, 2011)

Existem algumas pesquisas que foram realizadas no solo de Passo Fundo/RS com esse método, a primeira feita por Rizzon (2016) que avaliou o comportamento de melhoria do solo através golpes percussivos de DC à cabo e por Giese (2019) que estudou a melhoria e comportamento do solo quando submetido a impactos de DC á queda livre, entretanto a melhoria gerada não foi significativa tanto na rigidez, quanto na resistência ao cisalhamento. Desta forma, esta pesquisa tem como proposta desenvolver um método de melhoramento de

solo através da substituição dinâmica em um solo laterítico argiloso localizado no município de Passo Fundo/RS com adição de camadas de areia de Osório/RS melhoradas com cimento Portland CP V ARI compactadas, em escala de protótipo, especificamente no campo experimental da Universidade de Passo Fundo (CETEC).

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Os métodos da compactação dinâmica e substituição dinâmica aliam vantagens econômicas e ambientais no que tange ao melhoramento de solos em grandes áreas. Estes métodos representam uma das poucas alternativas de otimização das capacidades resistentes (c' e φ') através do melhoramento mecânico (densificação) em profundidades significativas (3 – 8m, em média), como também permite uso de materiais naturais ou resíduos da construção civil para a sua aplicação. Contudo, existem muitas lacunas quanto a utilização do método da compactação dinâmica e substituição dinâmica em solos residuais e/ou lateríticos que precisam ser respondidas com estudos experimentais.

Até então, a quantidade de pesquisas é diminuta em relação a este método em solos tropicais e subtropicais. No Brasil existem apenas dois trabalhos realizados que são o de Rizzon (2016) e Giese (2019) no solo laterítico de Passo Fundo/RS. Solos com estas propriedades e peculiaridades são predominante em território brasileiro e frequentemente são presenciados em obras de cunho rodoviários, aeroportuário e nos grandes centros urbanos, sendo que muitas vezes técnicas com maiores impactos ambientais e mais onerosas são consagradas em função da cultura de construção geotécnica estabelecidas pelas empresas e consultoras.

Especificamente o solo laterítico de Passo Fundo/RS, embora rígido à baixas tensões confinantes, apresenta baixa capacidade de carga suporte quanto a resistência ao cisalhamento, sendo apropriado para estudos de substituição dinâmica. Em termos paramétricos, existem dois estudos realizados neste tipo de solo que justificam as variáveis investigadas da pesquisa em questão, que são os de Rossi (2019) e Giese (2019). A primeira estudou em escala real a viabilidade técnica de camadas melhoradas com cimento com dimensões variadas e o segundo estudou o melhoramento químico e mecânico (compactação dinâmica e compactação dinâmica com adição de camada melhorada) no mesmo site.

Ao analisar os resultados de ambos os estudos, com base nos ensaios de placa, foi percebido que a melhoria por compactação dinâmica possibilitou a redução da rigidez inicial em

consequência da ruptura da cimentação natural, entretanto comparado ao solo natural, para grandes deslocamentos, a resistência ao cisalhamento foi levemente superada na fase plástica. Aliado a isso, dado o alto ω do solo de Passo Fundo/RS, o uso singular da compactação dinâmica é ineficiente pois ele atinge baixos valores de γ_d devido ao solo laterítico estudado naturalmente apresentar um ω médio superior ao teor ω ótimo. Desta forma, a compactação ocorre no ramo úmido da curva de compactação e eleva o grau de saturação do solo conforme ocorre a densificação, conseqüentemente produzindo uma estruturação dispersiva e menos resistente ao cisalhamento.

Rossi (2019) demonstrou que a introdução da camada melhorada altera a rigidez do sistema, de forma que quanto maior a área da camada melhorada para uma mesma espessura, há maior área mobilizada para resistir ao carregamento e, portanto, maior distribuição das tensões na base da camada, o que eleva capacidade de carga da fundação.

De forma geral, Rossi (2019) demonstrou que o comportamento carga *vs* recalque das camadas melhoradas foram superiores aos resultados dos ensaios de placa obtidos nos estudos de Giese (2019), ainda que a área de melhoria Giese (2019) fosse superior ao de Rossi (2019). Isto é um indicativo de que a leve diferença existente na espessura da camada melhorada afeta significativamente a resposta do sistema camada melhorada/solo. Também foi observado por Giese (2019) que a introdução da camada melhorada de 220 mm na cratera produzida pela compactação dinâmica gerou não apenas o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, como também o aumento da rigidez do sistema solo compactado/camada melhorada comparado aos resultados de ensaio de placa no solo compactado dinamicamente e em estado natural.

Tendo em vista os aspectos supracitados, este estudo baseia-se na hipótese de que a adoção do método da substituição dinâmica com uso de solo granular com variadas profundidades e adição de camadas melhoradas de variadas espessuras pode vir a ser um método alternativo de melhoramento com geração de respostas de carga *vs* deslocamento mais satisfatórias comparadas aos estudos de Giese (2019), Rossi (2019) e demais outros. Esta proposta difere de trabalhos publicados por outros autores na literatura [ex., Hamidi, 2014; Tarawneh *et al.* 2017; Tarawneh *et al.* 2019].

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um método de melhoramento através de experimento em solo laterítico argiloso com base no método da substituição dinâmica (*Dynamic Replacement*) com adição de camadas de solo melhorado com cimento portland compactadas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esta tese possui como objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da espessura da camada de solo melhorado com cimento introduzido numa cratera preenchida com solo granular compactado dinamicamente, quanto ao comportamento carga vs deslocamento através de ensaios de placa;
- Avaliar o efeito da profundidade da coluna granular compactada dinamicamente, quanto ao comportamento carga vs deslocamento através de ensaios de placa;
- Estudar os modos de falha gerados nas camadas melhoradas e colunas granulares após ensaio de placa;
- Analisar a densificação do material granular quando submetido à compactação dinâmica;
- Comparar o método proposto com os dados do Giese (2019);
- Comparar medidas de desaceleração do martelo de compactação com o obtido por Giese (2019);
- Estudar o comportamento das vibrações no solo gerado durante o melhoramento do solo por substituição dinâmica;
- Avaliar a eficiência do solo laterítico melhorado através do ensaio SPT e amostras indeformadas coletadas;
- Desenvolver simulações numéricas com base nos dados do método de melhoramento de solo proposto validadas a partir dos resultados dos ensaios de placa de campo.

1.4 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Esta tese possui como objetivos secundários:

- Desenvolver um gatilho (*trigger*) para liberação de martelo destinado à compactação dinâmica de solo em queda livre;
- Desenvolver um inclinômetro experimental de baixas proporções e econômico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico foi expresso o estado da arte da pesquisa, fazendo abordagens sobre conceitos, aspectos históricos, equipamentos, aplicações da técnica (*Onshore* e *Offshore*), modelos numéricos e outros pontos da substituição dinâmica. Como a substituição dinâmica representa um desmembramento da compactação dinâmica, em muitos pontos deste trabalho serão explicados aspectos da compactação dinâmica para fundamentar a substituição dinâmica. Foram também elencadas informações e pesquisas a respeito de melhoramento químico de solos granulares e argilosos realizadas no Brasil e no mundo. Além destes, pesquisas literárias foram produzidas a respeito do instrumento geotécnico inclinômetro considerando os conceitos, tipos, equipamentos, procedimentos de leitura, fontes de erros, modelos experimentais e outros.

2.1 USO DE COMPACTAÇÃO DINÂMICA E SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA NA HISTÓRIA

Mittal (2012) afirma que os primeiros relatos de densificação de solos remontam à antiga Índia, onde elefantes eram usados como solução para a compactação de solos a partir do pisoteamento. Outros animais como vacas, bois e bezerros também foram utilizados para a densificação do solo seguindo as especificações do antigo conjunto de regras construtivas hindus escritas em *Manasara Shilpashastra*. Contudo, o primeiro relato desta técnica ocorre no império da Roma Antiga através dos escritos do Arquiteto Marco Vitruvius Poleão afirmando que o solo atingiria um nível de rigidez e resistência através da queda de um martelo ou peso sobre a sua superfície. Existem documentos que comprovam o uso desta técnica na China, cujo método do melhoramento por compactação dinâmica foi descrito no código chinês da dinastia *Dung*, em 1103 a.c.

Lobo (2017) citou que a abordagem formal desta técnica ocorreu no início de 1830 através de uma publicação da autoria do francês *Rondelet*, reimpresso em 5 volumes de livros alemães intitulados “*Kurst Zu Baun*”.

Anos mais tarde, no século XIX, Lundwall¹(1968 *apud* SLOCOMBE,2013) relatou que um antigo canhão de guerra foi usado para compactar terreno em 1871. A compactação dinâmica profunda por compactação pesada foi aplicada na Áustria e na Alemanha desde a década de

¹Lundwall, N.B. (1968). "The Saint George Temple". Temples of the Most High. Bookcraft: Salt Lake City, Utah, Chapter 3, p. 7

1930, porém houve restrições quanto ao martelo de compactação que tinha cerca de 10 toneladas e era liberado de alturas em torno de 10 m. (ADAM E BRANDL, 2009)

Loss (1936) publicou um dos primeiros trabalhos a respeito da técnica de compactação dinâmica a partir de um comparativo da efetividade de diferentes métodos de compactação em solos não coesivos para obras rodoviárias alemãs. O autor salientou que em 1933, quando a compactação foi exigida em muitos trabalhos, apenas as chamadas unidades universais estavam disponíveis, cuja estrutura dispunha de uma chapa de ferro fundido pesando cerca de 2 toneladas fixada com corda numa pá-carregadeira a vapor, que ao ser solta de uma altura de 1,5m, compactava o solo pelo impacto.

Nesses trabalhos, foram compactados solos não coesivos com um bloco de 1,8 toneladas a uma altura de 1,5m através do uso de retroescavadeiras a vapor, e que em três anos mais tarde um grupo de engenheiros experimentou usar a compactação dinâmica com grandes blocos na construção da barragem de *Franklin Falls*.

Nos anos 1940 foram executadas aplicações de compactação dinâmica para melhoramento de solos no aeroporto da China, na zona portuária de Dublin (Irlanda), e na fundação de um tanque de óleo na África em 1955. (SLOCOMBE, 2013). Smolczyk²(1983 *apud* MEHDIPOUR e HAMIDI, 2017) citou que o método foi inicialmente empregado em 1957 pelo laboratório de pesquisa do Reino Unido para avaliar o efeito do impacto causado pela queda de um peso no grau de compactação de areias argilosas.

Lobo (2017) comentou que em 1960, na Rússia, se utilizou a técnica para densificar solos parcialmente argilosos e arenosos. Hamidi *et al.* (2011a) relataram que Menard executou a sua primeira compactação dinâmica em *Bormes-Les-Mimosas* na França e que mais tarde, em 1969, mudou-se para a marina em *Madelieu-la Napoule* em Riviera, onde dimensionou e monitorou trabalhos de compactação dinâmica de um projeto de construção com uma área de 110 000 m² recorrendo a um bloco com uma massa equivalente a 80 toneladas que foi largado de uma altura de 10m.

Em 1970, a *Technique* Louis Menard introduziu a conhecida compactação pesada (“*Heavy Tamping*”) como técnica de melhoramento de solos. Seu campo de aplicação cobria principalmente os depósitos sedimentares ou solos naturais de cascalho arenoso, embora a sua aplicação tenha se propagado para solos argilosos ou aluviões saturadas. A partir de então, a técnica tomou o nome de "consolidação dinâmica". (MENARD e BROISE, 1975). Neste

² Smolczyk, U. (1983). “Deep compaction”, *8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, pp. 1105 -1116

período, houve um desenvolvimento significativo desta técnica com pesos compactadores de 20 a 25 toneladas caindo de alturas até 22,5m, melhorando assim os solos moles e turfas para um trecho rodoviário na Áustria. (BRANDL E SADGORSKI, 1977³apud KOPFT *et al.*, 2010). Além destes, precisamente em 1975, o Menard evoluiu o método da compactação dinâmica introduzindo o método da substituição dinâmica como uma alternativa de técnica de melhoramento das propriedades de solos de grãos finos saturados e deformáveis.

Slocombe (2013) citou que, com o advento de grandes guindastes de esteiras, houve elevação dos níveis energia que permitiram a aplicação regular na França, em 1970, e subsequentemente na Grã-Bretanha, em 1973, e na América do Norte, em 1975. Uma extensão do conceito de compactação foi criada com o desenvolvimento da compactação de impacto rápido conhecida como *Rapid Impact Compaction*, concebida no final da década de 1970 na Inglaterra para o reparo rápido de danos causados à explosão em pistas de pouso militares usando martelos hidráulicos modificados da *BSP Internacional Foundations* e atuando sobre uma base de aço que permanece em contato com o solo. (SLOCOMBE, 2013; ADAM E BRANDL, 2009). Lauzon *et al.* (2011) comentou que no início dos anos 1990 a tecnologia do RIC foi disponibilizada para obras civis. A empresa Menard® realizou o primeiro projeto de compactação dinâmica *offshore*, em 1973, como parte da construção do dique seco pré-fabricado da *Brest Naval Port*, na França. (HAMIDI, 2014)

A experiência brasileira quanto à técnica da compactação dinâmica, de um modo geral, não foi efetiva e bem-sucedida dada a singularidade das propriedades dos solos tropicais. Até então, se sabe que existiram três tentativas de aplicação da técnica, com êxito em uma delas, sendo elas: a) Tentativa de melhoramento de solos moles, em 1975, em obras de ampliação da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA-SP); b) Tentativa de melhoramento de solos moles no estaleiro na enseada do Paraguaçu, em 2015, pela empresa Mecasolo® e c) um caso restrito no qual houve eficiência da aplicação da técnica na Base Naval de Itaguaí- RJ em solos moles pela empresa Mecasolo® recentemente. O que se comenta é que a ineficiência desta técnica em solos tropicais nacionais se dá pela ausência de auxílio de técnicas de consolidação complementares, como estacas, areia ou brita e drenos verticais. Nos últimos anos, Rizzon (2016) e Giese (2019) realizaram os primeiros estudos do efeito da compactação dinâmica em um solo laterítico no município de Passo Fundo/RS e obtiveram resultados significantes quanto

³ Brandl, H. & Sadgorski, W. (1977) Dynamic stresses in soils caused by falling weights. *Proc. 8th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow. pp. 187- 194.

a melhoria das propriedades mecânicas, de deformabilidade e hidráulicas (condutividade hidráulica).

No mundo, existem inúmeros relatos a respeito do uso da técnica em variados tipos de intervenções e obras, inclusive mencionados na literatura, como é o caso da densificação do aeroporto de Nice na França em 1977 (GAMBIN, 1983); construção de um armazém nos EUA (LEONARDS *et al.*, 1980); planta automobilista em *Cádiz*, Espanha e planta de fertilizantes em *Ashuganj*, Bangladesh (O' BRIEN e GUPTAN, 1984); construção de silos de armazenamento de cimento para *Larfarge Canada Inc.*, construção de uma edificação na Mina *Highvale* que fica às margens do Lago *Wabamun* em Alberta, Canadá, no ano de 1988 e construção de uma Loja/Armazém de atacado de clubes de preço realizada em *Trois Rivières* Quebec, Canadá, em 1992 (DUMAS *et al.*, 1993); construção de aterros para estradas em Indiana (EUA), segundo Lukas (1995); trecho à direita do rio *Saint-Laurent* próximo ao Quebec, Canadá (CHOW *et al.*, 1990); uma seção da rodovia interestadual ao norte de Birmingham, no Alabama, Estados Unidos (CHOW *et al.*, 1990); melhoramento de um terreno na Baía de *Daya* (China) para implantação de uma refinaria (FENG *et al.*, 2011); melhoramento de solo do *Blue City Project*, de Omã (HAMIDI *et al.*, 2011a); *Jaber Al-Ahmad City*, que está localizada na planície costeira da Baía do *Kuwait* (TARAWNEH *et al.*, 2017); várias obras de tanques, silos, edificações, indústrias, rodovias que estão alocadas no Oriente Médio e na Ásia (HAMIDI, 2014; INDRATINA *et al.*, 2015). Outros casos mais recentes podem ser encontrados nos *sites* da Swissboring (2021) e da Menard Group (2021).

2.2 MECANISMO DE DENSIFICAÇÃO

O fundamento da compactação dinâmica se baseia na redução de vazios, particularmente, para o tratamento de solos granulares, mistos e coesivos. Isso foi estendido para solos naturais mais finos, nos quais a energia de impacto gerou aumento da resistência ao cisalhamento devido a ocorrência de sucção localizada e a dissipação do excesso de poropressão dos sedimentos de argilas, sendo assim uma consolidação dinâmica. (SLOCOMBE, 2013).

O mecanismo da densificação do solo funciona de tal maneira que as forças são transferidas a partir da superfície, exercendo pressão nas partículas do sistema, mobilizando-as devido as ondas de choque transmitidas pelo meio durante contato do peso à superfície do solo. Essas ondas de choque podem existir como ondas volumétricas ou ondas de contorno dependendo da direção do movimento (TAN, 2007).

Mitchell (1981) afirmou que a densificação do solo não coesivo, através do melhoramento das propriedades mecânicas, requer primeiro que as estruturas iniciais do solo sejam quebradas para que as partículas possam configurar novos arranjos. Em materiais não coesivos saturados, utiliza-se para induzir a liquefação por meio de cargas dinâmicas e cíclicas. No decorrer da compactação pesada, a onda de compressão gerada pela transferência de energia através da queda da massa permite a concentração de tensões neutras, o que conseqüentemente reduz consideravelmente a resistência ao cisalhamento do solo. Com isso, a onda gerada é seguida por uma onda de cisalhamento que é responsável pela falha da massa de solo e que posteriormente as partículas do solo se estabelecem em posições novas até se tornarem estáveis.

Em estudos de compactação dinâmica interpretados com base em MED (Método dos elementos discretos), Jia *et al.* (2018) explicaram que as deformações do solo através deste método é composto por dois fenômenos: o primeiro ocorre em função da punção do solo superficial, que é acompanhada pela formação de cunhas de cisalhamento (*shear bands*) acompanhado por um cônico plástico (*conical core*) análogo ao mecanismo de capacidade de carga de fundações superficiais; o segundo ocorre em cotas mais profundas, que é acompanhada pela propagação de ondas dinâmicas causadas pelo arranjo de partículas em função das cargas de impacto. Estes fenômenos podem ser presenciados na figura a seguir (ver a Figura 1).

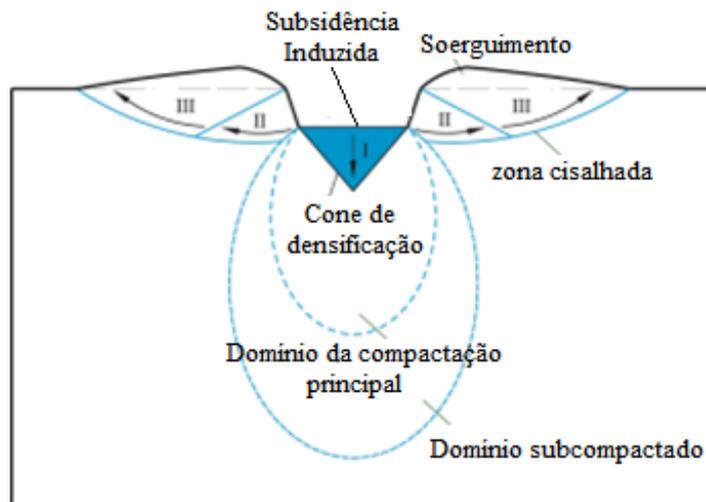


Figura 1 – Mecanismo de densificação do solo após à compactação. (Fonte: Jia *et al.*, 2018)

Estes subdividiram a zona compactada em dois domínios, dependendo do nível da compactação do solo. Chow *et al.* (1992) apresentaram a formulação da velocidade de impacto a partir de modelagem numérica de tensão vs deformação baseada na equação da onda por meio da equação (1):

$$V_o = 2\sqrt{gHE} \quad (1)$$

*Obs: Caso o sistema seja realizado por cabos pode haver perdas por atrito, o que conseqüentemente reduz a eficiência da queda. Em caso de queda livre ξ é igual a 1.

Mayne *et al.*⁴(1983 *apud* HOMAN, 1985) propuseram uma formulação de transferência da tensão dinâmica ao solo (σ_{dz}) pelo impacto do martelo de compactação a partir da equação (2) a seguir:

$$\sigma_{dz} = V_o V_p (\gamma/g) \quad (2)$$

Quaisquer que sejam as propriedades deformáveis detalhadas de um meio, elástico ou não, a consequência imediata de um impacto superficial é uma tensão de contato altamente localizada que origina a partilha de momento entre as fatias finas dos respectivos materiais confrontando a superfície de contato.

O nível de tensão inicial é, portanto, relativo à desaceleração do peso e as propriedades dinâmicas do meio, como a impedância específica da onda acústica. Comportamentos subseqüentes, como decaimento da tensão superficial, duração do pulso e extensão da penetração do movimento principal, são determinados pela maneira como o corpo do meio impactado reage ao movimento imposto na superfície.

De um modo geral, existem diferenças entre as respostas de solos granulares e coesivos quando submetidos aos impactos de alta energia do processo. Os comportamentos de densificação dos solos granulares e argilosos podem ser vistos nos itens 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3.

2.2.1 Densificação de solos granulares

Bo *et al.* (2009) e Slocombe (2013) afirmaram que em materiais granulares secos, a compactação dinâmica permite o deslocamento físico de partículas e, numa extensão mais ampla, a excitação de baixa frequência reduzirá o índice de vazios e aumentará a densidade

⁴Mayne, P. W., Jones, J. S., Bondra, L. H (1983)"1-65 Impact Densification Study-Jefferson County, Alabama", *Law Engineering Report No. B-3241*.

relativa para proporcionar características mecânicas e deformáveis que atendam às necessidades do projeto. Do ponto de vista microestrutural, após a compactação os grãos se rearranjam até atingir uma configuração mais densa e descontínua e que por sua vez a sua macroestrutura manifesta deslocamentos na superfície, conforme a Figura 2.

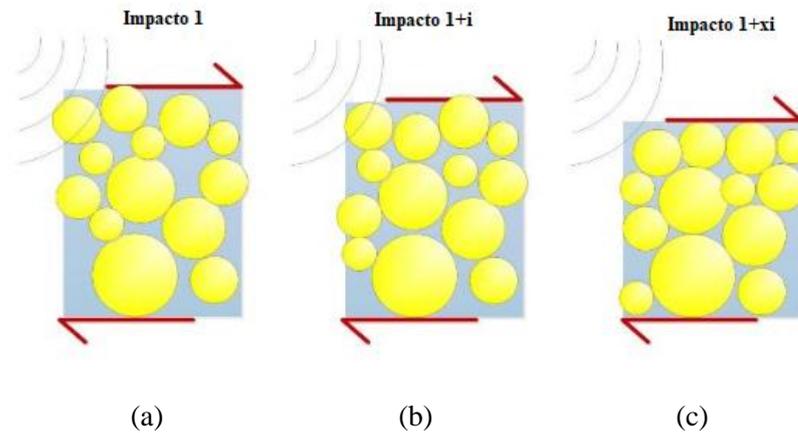


Figura 2 – Microestrutura dos Solos granulares: a) Estado natural; b) Medianamente denso após compactação; c) Estado altamente denso após compactação. (Fonte: Própria, 2020)

O comportamento dos materiais friccionais pode ser interpretado com base na teoria do estado crítico fundamentada por Schofield e Wroth (1968) com contribuições experimentais de Atkinson e Bransby (1978) e Atkinson (1993). No caso das areias fofas, o comportamento volumétrico, em função da baixa compactidade o material, revela-se contrativo, cuja relação τ x ε (tensão cisalhante vs deformação) é caracterizada pela ausência de tensão de pico e tendência assintótica da resistência última. Quanto as areias compactas, quando submetidas a tensões cisalhantes, atingem a tensão desviadora máxima (tensão de pico) para em seguida, gradualmente, diminuir para um valor último, conforme ocorrerem deformações plásticas cisalhantes. Neste processo, o solo inicialmente experimenta diminuição de volume (leve contração), para depois manifestar expansão volumétrica, ou seja, comportamento dilatante ($\Psi < 0$) até um estado de volume constante correspondente ao estado crítico. Em solos densos, a medida em que há emprego contínuo de energia de compactação por impacto, visualmente percebe-se uma tendência de absorção da energia e arqueamento de tensões para o estrato rígido. (SLOCOMBE, 2013)

Deve-se salientar que neste processo, quando submetidos a grandes energias de impacto, o rearranjo dos grãos ocorre de forma concomitante a quebra dos grãos e, portanto, pode ser sugerida uma alteração na curva granulométrica do material, o que conseqüentemente interfere

na densidade relativa do material. Jia *et al.* (2018) demonstrou a possibilidade de ocorrência da quebra de grãos com auxílio de simulação numérica em MED.

Além disso, quando há presença de materiais granulares abaixo do lençol freático, um impulso dinâmico é criado e é transferido para os fluidos concentrados nos poros, de forma que após uma determinada sequência de golpes na superfície, pode ocorrer eventualmente uma alteração no equilíbrio das tensões internas do solo saturado e por sua vez induzir o fenômeno da liquefação do solo. Tendo em vista esta possibilidade, Craig (2012) salientou a necessidade de adoção de baixas energias de compactação (alturas reduzidas e/ou martelos de baixas) na presença destes solos. Slocombe (2013) acrescentou que a densidade e a classificação dos solos são fatores importantes no controle da velocidade de ativação do estado de liquefação. Faz-se ressalvas quanto às vibrações de baixa frequência causadas por impulsos de tensões que poderão reorganizar as partículas em um estado mais denso.

Segundo Wang *et al.* (2019), quanto mais energia de compactação for conduzida, maior será a zona de liquefação induzida. O nível de energia do martelo tem um efeito significativo na dimensão da zona de liquefação em todo o processo de DC, uma vez que a dissipação do excesso de poropressão é muito mais lenta do que a geração de excesso de poropressão. Slocombe (2013) afirmou que a dissipação em conjunto com o acréscimo de tensão efetiva da camada liquefeita pelos solos acima, resulta em um aumento adicional na densidade relativa ao longo de uma faixa de tempo relativamente curta. Isso pode variar de 1 a 2 dias para areia e cascalho bem graduados a até 1 a 2 semanas para siltes arenosos dependendo da energia aplicada.

Michalowski e Nudukuru (2012) explicaram que quando as areias saturadas são compactadas dinamicamente, as forças de contato entre os grãos são perdidas e desencadeiam a liquefação, e os próprios contatos são reconfigurados para atingir um nível de empacotamento maior. As tensões efetivas são reduzidas a zero na fase de liquefação, mas o estado de tensão é reconstruído após a dissipação da poropressão. A tensão vertical macroscópica é regulada pela gravidade, mas a tensão horizontal não tem uma forma comparável de regulação. Gambin⁵(1997, *apud* HAMIDI, 2014) explicou que devido aos ciclos de compressão e alívio na fase líquida, a onda primária de compressão tende a deslocar os grãos de solo e se inicialmente o solo estiver num estado fofo, a onda secundária de cisalhamento pode quebrar a estrutura do solo e assim permitir um rearranjo dos grãos. Wang *et al.* (2019) através de estudos de

⁵Gambin, M. P. Le Compactage Profond Des Sables, Idées Des Base. **3rd International Conference on Ground Improvement Geosystems: Densification and Reinforcement**, London, 1997, pp. 1-27.

modelagens numéricas com acoplamento de modelo hidrodinâmico e perceberam que em solos granulares saturados há um aumento significativo da poropressão após cada impacto que resulta em uma liquefação local e na limitação do efeito de queda posterior.

Michalowski e Nudukuru (2012) concluíram que as areias liquefeitas durante a compactação dinâmica recuperam o estado de tensão efetiva com a tensão horizontal menor do que antes da liquefação, fenômeno este constatado em simulações através do DEM. Estas simulações indicaram que o aumento na tensão horizontal em um leito de areia pode ser causado por um aumento na rigidez do contato intergranular. Este aumento na rigidez do contato ocorre devido ao processo retardado de degradação das características micromorfológicas e nos contatos das superfícies dos grãos, aumentando assim a proximidade intergranular. Conseqüentemente, a rigidez macroscópica da areia aumenta, e sob condições de tensão 1D, a tensão horizontal no leito de areia aumenta, sendo assim necessária para o equilíbrio de energia.

2.2.2 Densificação de solos argilosos

Slocombe (2013) afirmou que a resposta das argilas é mais complexa que a dos solos granulares, salientando que há distinção de resposta dependendo do nível do lençol freático. Na teoria convencional de consolidação, um carregamento estático de sobrecarga permitirá o colapso através dos vazios existentes da argila e drenará a água conduzindo a consolidação e conseqüentemente aumentando a resistência ao cisalhamento. A magnitude com a qual isso ocorre depende da carga imposta, do coeficiente de consolidação e da distância do caminho de drenagem.

Analogamente falando, a compactação dinâmica representa um carregamento instantâneo e localizado que reduz o índice de vazios e transfere a energia potencial para a água existente nos poros do solo. Isso cria zonas de gradiente de pressão de água positiva que induzem a água a ser drenada rapidamente da matriz do solo. Desta forma, o uso complementar de geodrenos verticais facilita a aceleração da dissipação do excesso da poropressão. (NARENDRANATHAN e LEE, 2015)

Craig (2012) e Slocombe (2013) citaram que este efeito é ainda mais acelerado pela formação de caminhos (ou canais) de drenagem adicionais em função do cisalhamento e fratura hidráulica. Craig (2012) afirmou que a técnica permite acelerar a velocidade de adensamento, sendo conhecida como “adensamento dinâmico”. Há necessidade de cuidados na presença de argilas muito plásticas, uma vez que são suscetíveis a manifestar levantamento lateral. Neste

caso, os deslocamentos plásticos do solo ocorrem sem a efetiva densificação do conjunto de partículas devido a transferência de energia do impacto para água confinada nos poros. (SLOCOMBE, 2013; LUKAS, 1995)

Em termos de consolidação dinâmica, Segundo Menard e Broise (1975) e Kopft *et al.* (2010), o sucesso para a compreensão do mecanismo de consolidação dinâmica se baseia em quatro aspectos relevantes, que são:

- a) Compressibilidade de solos saturados devido à presença de microbolhas;
- b) Liquefação gradual sob impactos repetidos;
- c) Mudanças de permeabilidade de uma massa de solo devido à presença de fissuras e / ou o estado iminente à liquefação e do possível papel desempenhado pela água adsorvida;
- d) Recuperação tixotrópica.

Menard e Broise (1975) explicaram que o mecanismo de consolidação dinâmica para solos finos saturados se ampara em um método modificado do tradicional sistema hidráulico do cilindro totalmente preenchido por um fluido incompressível e suportado por uma mola, ou seja, a teoria de consolidação de Terzaghi. Experimentalmente, foi percebido que a operação de compactação sempre resultava em um adensamento imediato. Desta forma, a teoria tradicional, comumente utilizada para solos saturados impermeáveis, não se aplica aos processos de consolidação dinâmica.

Pesquisas subsequentes mostraram que a maioria dos solos quaternários continha gás na forma de microbolhas com teores variando entre 1% para os casos mais desfavoráveis e 4% no mais favorável. Como uma primeira aproximação, pode-se supor que as variações no volume dessas microbolhas de gás podem ser essencialmente governadas pelas leis de Marriotte e Henry, embora outros fenômenos menos conhecidos desempenhem um papel fundamental, como é o caso da tixotropia, conforme Figura 3.

A densificação do solo através do impacto do martelo de compactação pode atingir ou se aproximar do estado de liquefação a medida que a relação a percentagem de gás em relação ao volume de solo se aproxime de zero, uma vez que o material tenderá a se tornar incompressível. No que tange à tixotropia do solo compactado, o material altera as suas características reológicas o que permite que a água antes adsorvida no solo (envolta ao grão), em consequência das cargas alternadas, transforma-se em água livre, reduzindo a resistência ao cisalhamento do material. Com a evolução do tempo, o solo dissipa a poropressão por processos naturais e desencadeia a elevação da resistência ao cisalhamento e do módulo de deformação, fenômeno

este que é típico de argilas sensíveis, é aparente em todos os solos finos como: argilas, aluviões e areias aluvionares.

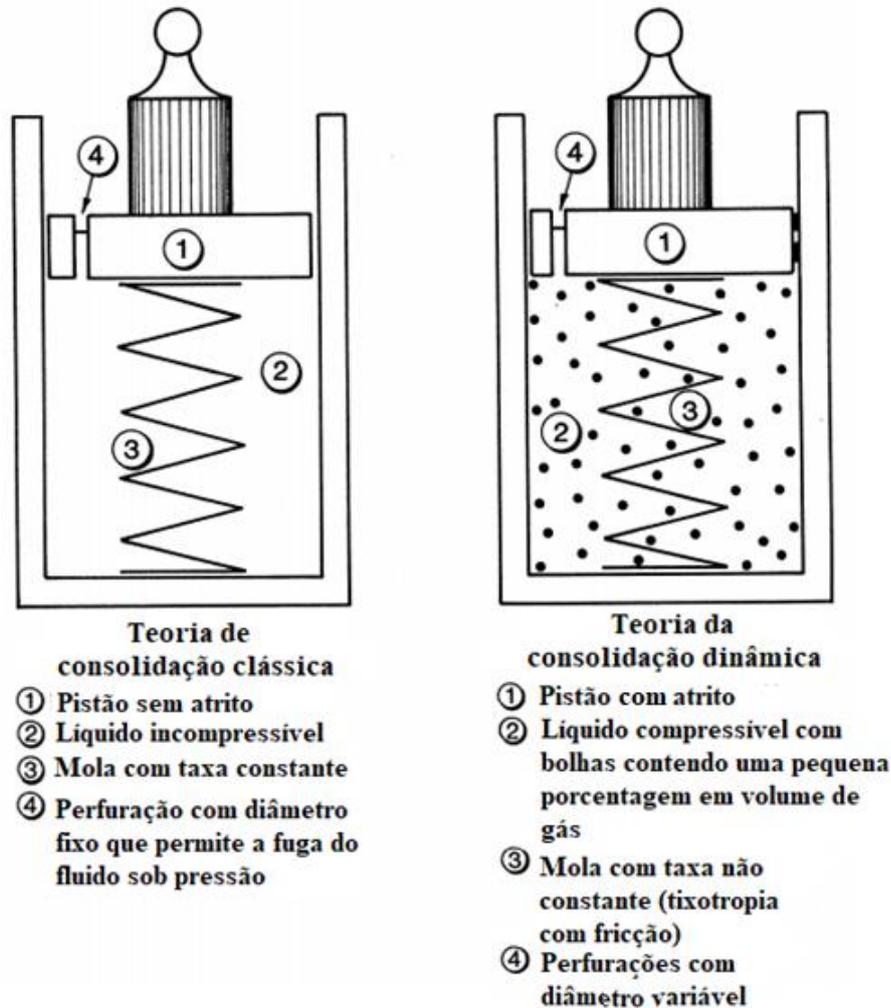


Figura 3 – Comparação existente entre a Teoria de consolidação clássica e a Teoria de consolidação dinâmica. (Fonte: Menard e Broise, 1975)

Em relação ao coeficiente de permeabilidade e , conseqüentemente, o coeficiente de consolidação, aumenta quando as tensões intergranulares diminuem, e atinge o valor máximo quando o solo se torna líquido, momento em que a poropressão é igual à pressão total. Isso ocorre porque, durante uma operação de consolidação dinâmica que geralmente resulta em condições locais que se aproximam da liquefação, altas permeabilidades podem ser observadas e estas estão associadas inicialmente com pressões muito altas.

Hamidi (2014) afirmou que no modelo de consolidação dinâmica, o líquido do poro que preenche o cilindro é considerado parcialmente compressível devido à presença destas microbolhas. No modelo clássico não há atrito entre o pistão e o cilindro, contrariamente ao modelo de Menard e Broise (1975), que apresenta atrito, o que resulta em uma histerese na interação entre o aumento da pressão hidráulica e a intensidade da sobrecarga do pistão. Portanto, uma redução na pressão do líquido não resulta automaticamente em um movimento do pistão ou uma mudança na mola.

Hamidi (2014) complementou citando que situações como essas são frequentemente observadas em solos de fundação, no qual a redução da poropressão não gera um adensamento correspondente na construção. No modelo clássico, a rigidez da mola (o módulo de deformação do solo) é considerada constante. No entanto, há consideráveis variações do módulo quando submetidas a cargas alternadas. A água absorvida, à medida que se torna parcialmente livre, interfere no contato mecânico entre as partículas sólidas

Menard e Broise (1975) ilustraram o comportamento após uma única passagem na Figura 4. Para tanto, foram desenvolvidas quatro relações em função do período, os quais: a) curva 1 demonstra a energia aplicada ao solo por uma série de impactos no mesmo ponto; b) curva 2 corresponde à variação de volume do solo; c) curva 3 mostra a evolução da dissipação da poropressão em relação à pressão de liquefação; d) curva 4, a evolução da capacidade de carga em função do tempo.

A passagem única representa uma série de golpes dados em um determinado momento. Como pôde ser visto, na medida em que há incremento da energia pelos golpes, o solo reage variando o volume, e logo em seguida há um aumento instantâneo da poropressão no meio. Ao passo que o tempo evolui, a poropressão gradativamente se dissipa e conseqüentemente ocorre aumento da capacidade de carga do solo. Esse aumento da capacidade resistente está intrinsecamente ligado ao fenômeno tixotrópico.

Mitchel (1981) afirmou que o intervalo de tempo necessário entre as fases pode variar dependendo do tipo de material, sendo geralmente um período de dias para areias grossas bastante drenadas, a semanas para solos mais finos e viscosos. A superfície do solo é geralmente nivelada entre as fases. Para garantir a uniformidade e a alta densidade na zona próxima da superfície, usa-se a técnica *Ironing*, cujas compactações com baixa energia são realizadas com o martelo de compactação em toda a superfície. Os assentamentos superficiais podem ser de 2% a 5% da espessura da zona a ser densificada por cobertura. A Figura 5 ilustra a variação comportamental do solo após séries de golpes na consolidação dinâmica.

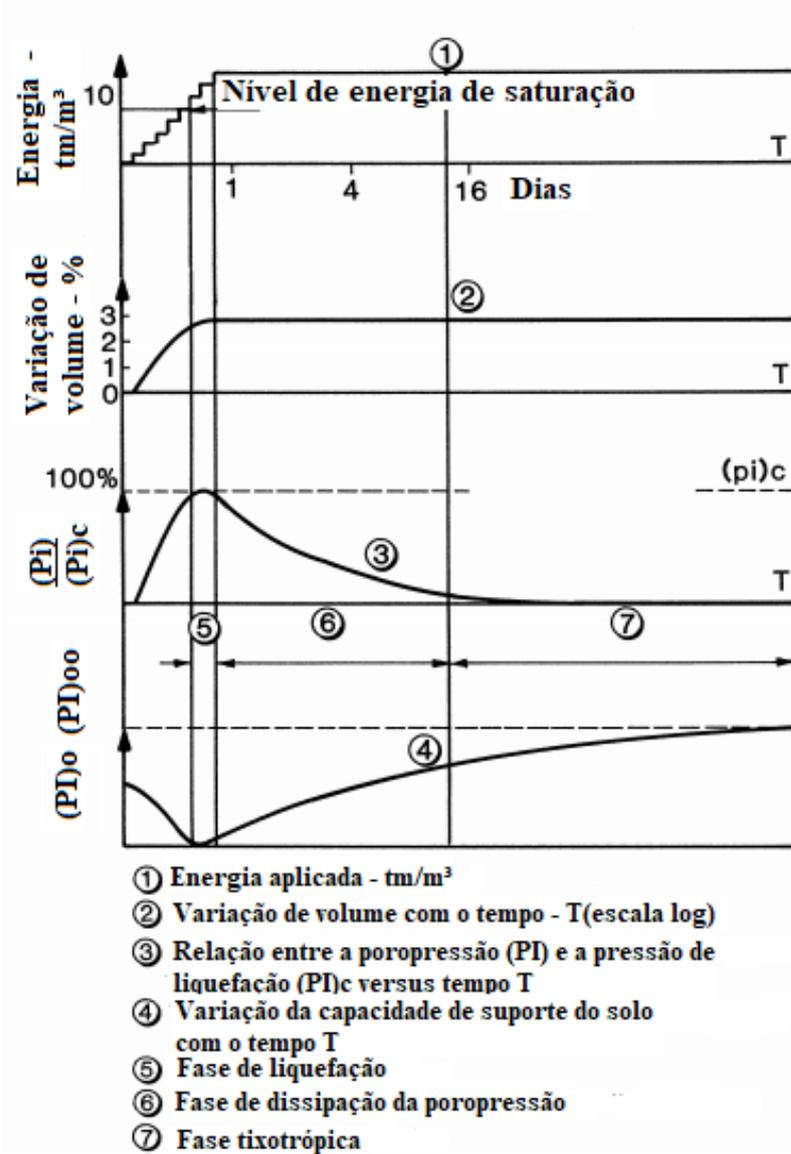


Figura 4 – Mudanças no comportamento do solo após passagem única. (Fonte: traduzido de Menard e Broise, 1975)

Como pode ser observado na Figura 5, em casos de passagens múltiplas, quando energia é aplicada em um padrão de progressão aritmética a pressão de liquefação responde de forma similar com patamares bem definido, porém as mudanças volumétricas e a variação da capacidade de carga não seguem a mesma tendência.

A variação volumétrica e a capacidade de carga comportam-se com uma determinada tendência cíclica, sendo que as amplitudes do grau de liquefação são praticamente constantes ao longo do tempo e das fases, embora apresentem valores iniciais distintos ao longo dos ciclos. A capacidade de carga reage de maneira parcialmente similar ao que acontece na passagem única, com reduções no momento do pico da poropressão e aumento conforme dissipação da

poropressão, porém conforme incrementa-se mais passada na compactação dinâmica, mais há aumento da capacidade de carga por ciclo.

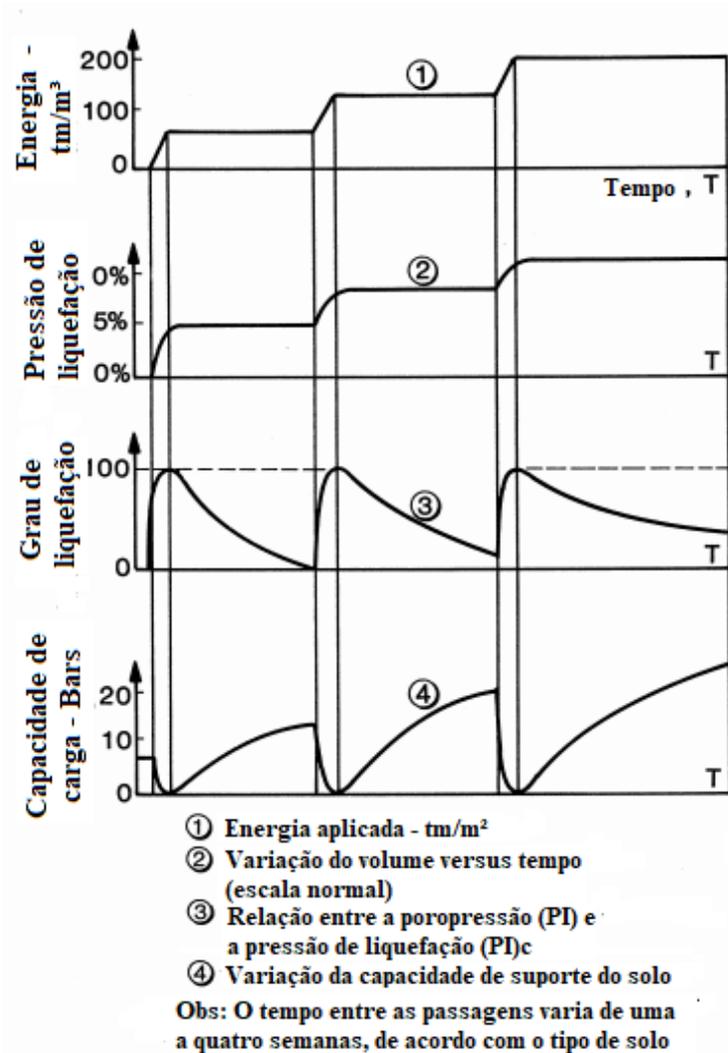


Figura 5 – Mudanças no comportamento do solo em situações de passagens múltiplas de consolidação dinâmica. (Fonte: Menard e Broise, 1975)

Lukas (1995) explicou que a quantidade das passadas está ligada ao grau de saturação do solo, assim como as condições de estabilidade da cratera e as dificuldades operacionais. Em casos de presença de solos saturados, estes serão submetidos a mais passadas do que os solos parcialmente devido ao maior tempo de dissipação da poropressão aliado ao elevado teor de umidade do solo. Quanto as condições de estabilidade da cratera, pode ocorrer “desbarrancamento” das laterais do furo requerendo mais passagens para regularização, e no que tange as questões operacionais ocorrem dificuldades na extração do martelo na cratera devido a formação de sucção de base no martelo de compactação. (GIESE, 2019)

O' Brien e Gupton (1984) enfatizaram que se a liquefação completa ocorrer devido ao excesso de poropressão, as crateras formadas pelos impactos de alta energia irão se aprofundar. Portanto, é necessário que os golpes sucessivos sejam planejados de tal forma que as pressões de poros em excesso geradas pelo esmagamento anterior tenham essencialmente se dissipado antes do início da batida.

Lukas (1995) afirmou que nas argilas moles ou depósitos orgânicos em profundidade dentro das formações podem absorver a energia da compactação dinâmica. Neste caso, pouca energia será transmitida abaixo dessas camadas para que as camadas inferiores não sejam melhoradas tanto quanto desejadas. Craig (2012) explicou que o impacto do martelo de compactação eleva o nível de poropressão nestes solos e que por sua vez se dissipa na direção circunvizinha.

Em solos argilosos, durante o tratamento, após um pequeno número de golpes, o crescimento começa a se desenvolver ao redor das bordas de cada cratera. Situações parecidas ocorrem quando se tenta fornecer tratamento a uma profundidade significativa em que as camadas superficiais são argilosas. A resistência dos solos superficiais pode reduzir em curto prazo, o que conseqüentemente pode afetar a para reconstituição das suas propriedades originais. Entretanto, isso é particularmente difícil quando há presença de camadas duras, entre 2 a 3 m de profundidade de argilas duras a muito duras, sobrepostas a um depósito granular que requer tratamento. (SLOCOMBE, 2013)

Lukas (1995) citou que em presença de camadas duras, o efeito que a camada mole terá na densificação depende em grande parte da espessura da camada e da sua posição abaixo da superfície do solo.

Quando as argilas se encontram abaixo do lençol freático, geralmente é necessária uma redução muito maior do teor de umidade na presença de um menor gradiente de poropressão disponível e um caminho de drenagem maior. A energia limite será alcançada muito mais rapidamente e resultará em um maior número de passagens de compactação de menor consumo de energia, exigindo prolongar os períodos de contrato em comparação ao nível de produtividade normal.

2.2.3 Densificação de solo laterítico argiloso

A densificação de solos em solos lateríticos argilosos ainda são incipientes. Rizzon (2016) ao iniciar os primeiros estudos de compactação dinâmica em solos coesivos friccionais usando sistemas de queda à cabo observou alguns aspectos, sendo eles:

- a) A condutividade hidráulica sofreu variação de duas ordens de grandezas, para o solo compactado, variando de 10^{-5} para 10^{-7} m/s, porém isso foi obtido através de amostras indeformadas do solo, e não *in situ*, considerando as possíveis macrofraturas da cratera;
- b) Os ensaios triaxiais mostraram alteração da resistência ao cisalhamento, com variação do φ' , e manutenção do c' . O φ' variou de $26,6^\circ$ para $35,3^\circ$. O c' se manteve na casa dos 14 kPa;
- c) Observou-se alteração da tensão de plastificação no ensaio de oedométrico, variando de 70 para 300 kPa. No mesmo ensaio pode-se verificar uma alteração dos índices de compressão e recompressão, com redução de 41% e 88%, respectivamente;
- d) O índice de vazios do solo variou de 1,21 para aproximadamente 1,01 após compactação, para todos os pontos.

Dadas as características porosas deste solo, a compactação dinâmica possibilitou a redução do índice de vazios acompanhada pela punção do martelo de compactação, com alguma alteração das características mecânicas, deformáveis e hidráulicas do solo na região da zona compactada. Giese (2019) realizou testes de compactação dinâmica no mesmo solo usando liberação em queda livre obteve índices de vazios de 0,91. Quanto aos parâmetros de resistência, em comparação com o solo natural, o φ' aumentou de $30,5^\circ$ para $35,9^\circ$ e o intercepto coesivo praticamente não se altera, com o valor de 10,6 kPa. Resultados semelhantes foram obtidos por Rizzon (2016). Giese (2019) comparou os formatos das crateras formadas no solo laterítico de Passo Fundo/RS com a dos solos granulares comumente realizados em outros países e concluiu que as geometrias eram semelhantes ao de um tronco de cone sem presença de levantamento lateral característico do efeito de puncionamento do solo, contrariamente ao que ocorre com as areias cuja configuração é similar de um semi-elipsoide com presença de levantamento lateral. Um outro aspecto interessante a ser mencionado são as trincas formadas nas paredes da cratera após a compactação solo, que são características de compactação dinâmica em solos argilosos. (MENARD e BROISE, 1975)

Giese (2019) estabeleceu que capacidade de carga última foi igual a 275 kPa para o solo natural e 300 kPa para o material compactado, havendo perda de rigidez inicial. Além disto, foi identificado em seus estudos que o solo compactado apresentou estratificações, com ocorrência de camadas sobrepostas, que possivelmente foram formadas através do colapso dos vazios presentes no solo natural, pela aderência parcial do solo à base do peso. Outra possibilidade seria a compactação do solo com teor unidade presente acima do teor de umidade ótimo (ramo úmido

da curva de compactação) que por sua vez por produzir estruturas dispersas com formação de camadas direcionadas semelhante ao que foi apresentado.

2.3 SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA

Hamidi *et al.* (2010a) explicaram que o método da substituição dinâmica é uma alternativa de melhoramento das condições do solo para permitir que critérios de projetos sejam atendidos, como capacidade de carga, faixas de recalques, estabilidade de taludes e consolidação do solo.

Esse método combina as vantagens das colunas de rocha com a compactação dinâmica, produzindo substituições dinâmicas de grande diâmetro com alta resistência ao cisalhamento interno. (TARAWNEH *et al.*, 2017; TARAWNEH *et al.*, 2019). Como vantagem, em função da diferença entre as rigidezes do solo de baixa capacidade de suporte e da coluna de solo compactado há indução de concentrações de tensões nas colunas e alívio de tensões no solo circundante, reduzindo a possibilidade de recalques por consolidação de estruturas apoiadas e aumentando das tensões efetivas do material da coluna, portanto, elevando a resistência ao cisalhamento. Lupiezowicz e Kanty (2015) explicaram que a técnica se aplica a solos finos (argilas e siltes), solos orgânicos e solos modificados por intervenções humanas.

Em linhas gerais, este método consiste em uma extensão da compactação dinâmica. Stinnete *et al.* (1997) afirmaram que é uma alternativa de melhoramento que visa estabilizar depósitos de solos orgânicos a partir da substituição deles por colunas de areia. Em termos práticos, o martelo de compactação é solto sistematicamente várias vezes em pontos específicos com o objetivo de densificar o material granular à percussão em solos coesivos compressíveis e/ou fofos, de forma a compactá-lo o suficiente para atender aos critérios do projeto compreendendo a fase “*tamper*” (HAMIDI *et al.*, 2010a; TARAWNEH *et al.*, 2017; TARAWNEH *et al.*, 2019).

Tarawneh *et al.* (2019) explicaram que embora se utilizem os equipamentos da compactação dinâmica, a energia de compactação tem o intuito de densificar o material granular no interior da cratera. Em termos operacionais, Menard (2019) citou que a necessidade de uso de plataformas de trabalho com espessuras de 0,60 m a 1,20 m. Contudo, VibroMenard (2019) citou que o procedimento de melhoramento é complementado com aplicação de uma camada de transição de esforços (com altura de 1 m) em substituição às plataformas de trabalho para distribuir os esforços nas colunas de granulares, sendo a mesma formada por um material granular compacto. Hamidi *et al.* (2010a) salientaram que, se necessário, o material pode ser pré-excavado antes das operações de melhoria do solo no local do impacto do DR (*Print*) em

função da existência de uma camada superficial rígida que dificultaria a melhoria em horizontes mais profundos, assim como para dissipar a poropressão da água.

Sekowski *et al.* (2018) enfatizaram a função do método de substituição dinâmica explicando que as colunas granulares (ver a Figura 6) criadas afetam características como resistência e rigidez. Tarawneh *et al.* (2017) e Tarawneh *et al.* (2018) expuseram que o método pode ser aplicável a uma variedade de solos distintos e elencaram outros aspectos, como aumento da consolidação de solos finos e redução dos recalques pós-construção.

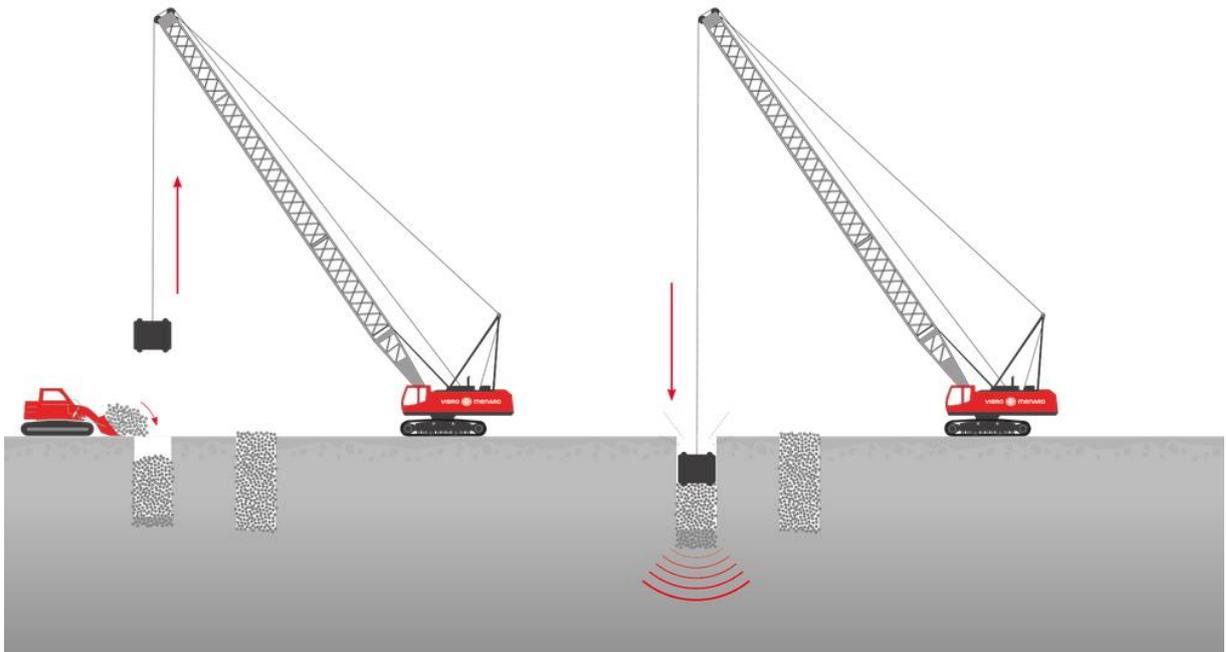


Figura 6 – Ilustração do procedimento da substituição dinâmica em solos. (Fonte: Vibromenard, 2019)

Tarawneh *et al.* (2017) descreveram aspectos específicos do método explicando que o preenchimento granular é compactado dinamicamente através de uma série de golpes de pesos variando entre 150 e 250 kN a alturas de 10 a 25 m produzindo uma coluna de solo reforçado de grande diâmetro (denominada tecnicamente de *pillar*) com diâmetros na faixa de 2 a 2,5 m e que pode chegar acerca de 7 m de profundidade. Em média, esse método pode atingir taxas de substituição de até 25% e cada coluna ter capacidade de carga de até 1500 kN.

Em termos de materiais de preenchimento, Han (1998) citou uso de materiais arenosos, cascalhos e agregados grosso. Outros autores informaram que as colunas podem ser produzidas usando uma variedade de materiais granulares com granulometria nominal de até 400 mm, teor de finos inferior a 15% e isento de matéria orgânica. (TARAWNEH *et al.*, 2017; TARAWNEH *et*

al., 2019). Estes sugeriram como possibilidade de materiais de preenchimentos o concreto demolido, cascalho, areia e materiais dragados. Sekowski *et al.* (2018) fizeram trabalhos de campo com mistura de cascalho fino com areia grossa e entulho na proporção 1:1.

Do ponto de vista mecanístico, a distribuição de tensões do solo melhorado ocorre de forma análoga a um radier estaqueado, uma vez que a camada de transição (radier) absorve estas tensões e transfere-as para colunas granulares (estacas) e que posteriormente são descarregadas em estratos mais rígidos em cotas mais profundas. Entre as colunas granulares de reforço, ocorre o fenômeno de arqueamento de tensões percebido pela redistribuição de tensões provocada pela interação coluna de reforço/solo circundante. Neste fenômeno, a proporção da carga atuante no sistema que alcança a estrutura enterrada é governada pela geometria e pela rigidez da coluna de reforço, pelas características físicas do solo e pelo tipo de carregamento (estático ou dinâmico).

Esse método combina as vantagens das colunas de rocha com a compactação dinâmica, produzindo substituições dinâmicas de grande diâmetro com alta resistência ao cisalhamento interno. (TARAWNEH *et al.*, 2017; TARAWNEH *et al.*, 2019) Como vantagem, em função da diferença entre as rigidezes do solo de baixa capacidade de suporte e da coluna de solo compactado há indução de concentrações de tensões nas colunas e alívio de tensões no solo circundante, reduzindo a possibilidade de recalques por consolidação de estruturas apoiadas e aumentando das tensões efetivas do material da coluna, portanto, elevando à resistência à cisalhamento global. Em termos práticos, a melhoria pelo método da substituição dinâmica ocorre de forma equivalente considerando a área de influência (espaçamento entre colunas e área da coluna), a resistência ao cisalhamento do solo local e a resistência ao cisalhamento da coluna DR. (TARAWNEH *et al.*, 2017) Kawalec e Warchal (2015) simularam o comportamento de tensão vs deformação das colunas DR com reforços de geogrelha para estabilização de aterro rodoviário e concluíram ser um método adequado para reforço.

No que tange aos casos de obra com a utilização do método da substituição dinâmica pode-se citar a publicação de Tarawneh *et al.* (2017), que descreveram o projeto de *Jaber Al-Ahmad City*, localizado na planície costeira da Baía do *Kuwait*, a cerca de 25 km a oeste da cidade do *Kuwait*, onde foram utilizados os métodos da compactação dinâmica e da substituição dinâmica em presença de estratos de siltes arenosos e areias siltosas de média densidade, argilas siltosas e argilas muito plásticas em até 5m; areias para areias siltosas de media densidade para densa e argilas siltosas e siltes argilosos de media plasticidade a plástica (entre 5 a 8 m), com uso de um martelo de 150 kN, número médio de 8 golpes (6 a 12 golpes) por fase e de 2 a 4 golpes na fase *Ironing* (ver a Figura 7).

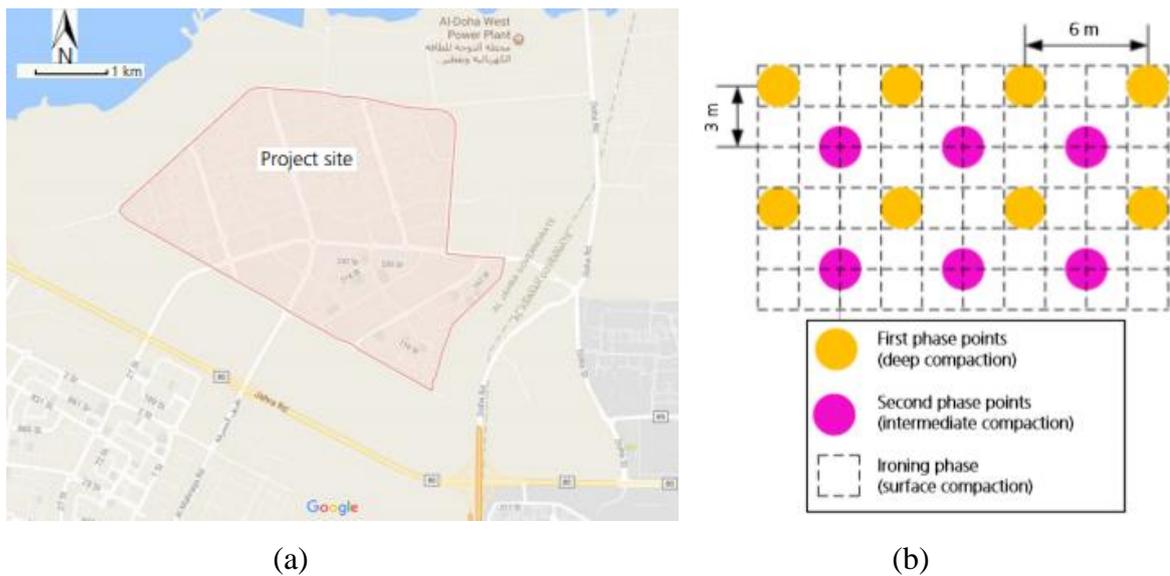


Figura 7 – Projeto de *Jaber Al-Ahmad City*: a) Planta de localização do projeto; b) *Grid* de compactação do projeto de *Jaber Al-ahmad City*. (Fonte: Tarawneh *et al.*, 2017)

Hamidi *et al.* (2010a) descreveram a aplicação da substituição dinâmica para construção de trincheiras de base para fundação de muro de contenção de solos reforçados utilizado na obra do *Abu Dhabi Ritz Carlton Hotel* (ver a Figura 8) localizado na cidade de Abu Dhabi (Emirados Árabes) com o objetivo aumentar o fator de segurança de estabilização do sistema aterro-muro de contenção-solo, conforme Figura 8a.

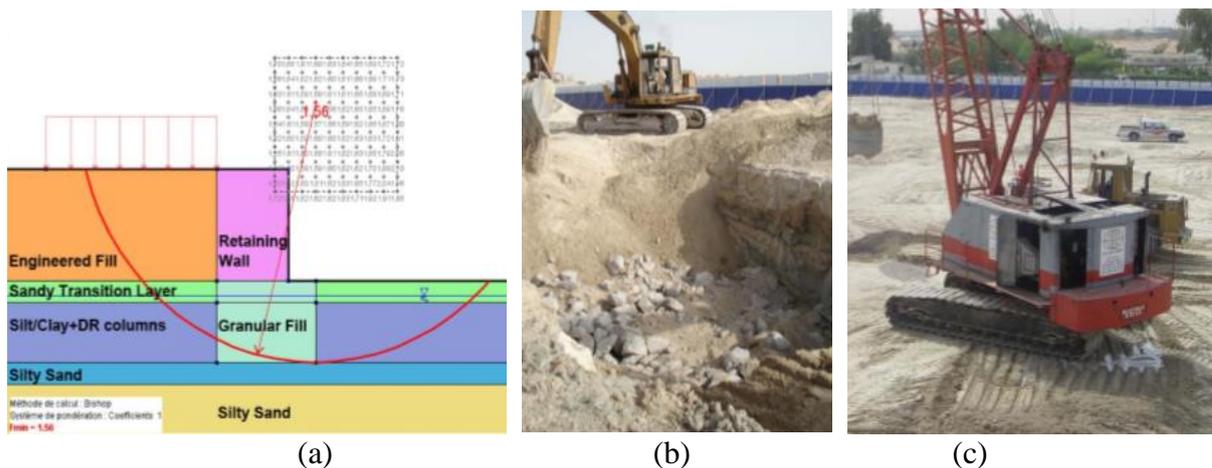


Figura 8 – Aplicação do método da substituição dinâmica na obra do *Abu Dhabi Ritz Carlton Hotel* em Abu Dhabi (Emirados Árabes): a) simulação do fator de segurança com a solução adotada; b) escavação mecanizada do solo; c) compactação dinâmica do material substituído. (Fonte: Hamidi, 2014)

Neste projeto em específico as condições de suporte do solo não eram favoráveis por conta da presença das argilas siltosas saturadas que atingiam até 5 m de profundidade com valores de N_{spt} entre 1 e 3 golpes. A solução adotada foi a escavação mecanizada de uma trincheira (ver a Figura 8b), substituição dinâmica com mistura de areia com concreto demolido e ao fim a construção do muro reforçado sob o solo melhorado (Figura 8c).

Solowski *et al.* (2018) estudaram o comportamento resistivo de uma coluna DR em um depósito de silte argiloso com pouca areia através de medições dos parâmetros c , ϕ' , S_u e M por meio de ensaios de CPTu e DMT variando a distâncias das leituras em relação a posição da coluna (2, 3, 4 e 6 m) e os tempos de leituras (0, 1, 8 e 30 dias). As medidas sugeriram que as mudanças na estrutura do solo tendem a depender da distância da coluna, do tempo decorrido e do tipo e da condição inicial do solo. A Figura 9 ilustra a resposta das medidas de q_c (MPa) em função da distância e do tempo em que foram realizadas as medidas.

Após as medições constatou-se que o solo próximo à coluna apresentou redução da resistência durante a sua formação, porém horas depois houve aumento da rigidez e resistência ao cisalhamento. Isso indica que as mudanças que ocorrem ao redor de uma coluna de DR são complexas. A alteração dos parâmetros após 30 dias da pós-construção pôde ser explicada pelo processo de consolidação gerado pelo impacto do martelo com energia elevada, sendo criadas rachaduras que desenvolviam caminhos preferenciais de drenagem explicado por Menard e Broise (1975).

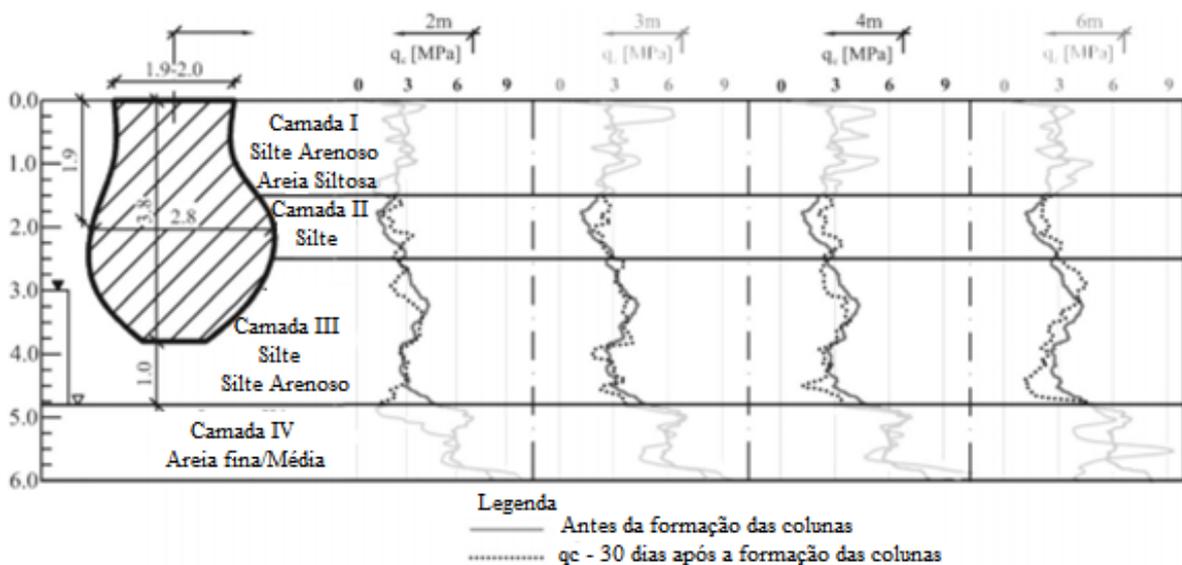


Figura 9 – Resultados obtidos após construção de uma coluna granular por substituição dinâmica. (Fonte: Sekowski *et al.*, 2018)

Além das obras supracitadas, existem outros relatos de casos de obras como, por exemplo, de Michelin *et al.* (2015). Neste trabalho é relatado o uso de colunas DR para a melhoria de fundação da construção da fábrica da *Eltas Transformer* e uma área de 60.000m² com presença de rochas vulcânicas e materiais siltoso em Izmir, Turquia. Além deste, Peng (2017) demonstrou a aplicação da substituição dinâmica para realinhamento de estacas pranchas de contenção através do aperto gerado pela formação de colunas de cascalho. Para tanto foi pensando formas de controlar a pressão e a magnitude da força de extrusão.

Hamidi *et al.* (2010b) citaram algumas obras que utilizaram o método da substituição dinâmica *offshore*, como: no cais de pesca de *Sfax*, Tunísia, utilizando martelo de compactação de 170 kN que compactou uma camada com 3 a 4 m de espessura de areia fofa siltosa para servir de base para muros de contenção. Em 1975, no Projeto de *Udevalla* na Suécia, foi realizado um tratamento em aterros de rochas graníticas com espessuras que variavam de 17m a 20m numa área de 50.000 m².

Em Lagos, Nigéria, foi aplicada a substituição dinâmica para compactar 10 m de espessura de areia siltosa localizada fundo do mar a -15 m de profundidade (ver o item 2.64); no sudeste asiático foi feito um teste, em larga escala, da substituição dinâmica (22,5 m x 22,5 m) com o objetivo de realizar tratamento de depósitos marinhos moles a uma profundidade de 30 m abaixo do nível da água do mar.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA

Holeyman e Vanneste (1988) afirmaram que a eficiência do melhoramento do solo por compactação dinâmica é afetada por vários fatores, que são: tipo de solo, propriedades do solo, condições iniciais de tensões, locação e efeito do grau de capilaridade, estratificação e formação do solo, dinâmica responsável no subsolo, profundidade e grau de compactação dos solos e efeito de vibração em estruturas adjacentes. Tendo em vista que a substituição dinâmica representa um desmembramento da compactação dinâmica, estes fatores são aplicáveis a substituição dinâmica.

Kopf *et al.* (2010) enfatizaram que os parâmetros de construção têm uma influência significativa na otimização da compactação e propagação de vibrações, tais como:

- a) Massa e forma de queda de martelo de compactação (“*pounder*” ou “*Tamper*”), cujos pesos planos de massa bastante pequena são preferidos para a compactação de superfície próxima, “suavização”, uma vez que a maior área do peso permite uma melhor

distribuição de carga no solo. Em relação aos pesos pesados com pequena seção transversal, atingem uma grande profundidade de compactação de ponto;

- b) Altura de queda;
- c) Espaçamento e *layout* da grade para pontos de compactação;
- d) Número de impactos por ponto de compactação e número de passes (um passe geralmente compreende de três a dez impactos);
- e) Sequência de pontos de compactação em relação à geometria e ao tempo.

Do ponto de vista teórico, o tipo de solo de preenchimento em substituição ao material local pode interferir no comportamento da coluna, as respostas dos parâmetros resistentes serão relativas a densidade relativa máxima que o material pode atingir em função da granulometria e energia de compactação.

Holeyman e Vanneste (1988) comentaram que podem existir três efeitos e que devem ser evitados, que são:

- a) Efeito de pavimentação: Uma camada muito densa é formada na superfície do solo. Esta camada absorve uma grande quantidade de energia de compactação e impede a densificação de camadas mais profundas;
- b) Efeito mustache: o solo na vizinhança imediata do ponto de impacto se desloca, entretanto, não compacta.
- c) Efeito de remoldagem lateral: Durante a formação progressiva da cratera, o solo é deslocado lateralmente ao longo de superfícies de falha cisalhantes, mas não compactadas.

Wang *et al.* (2019) concluíram que, no caso de solos granulares saturados, a permeabilidade não desempenha um papel importante na poropressão gerada na fase de impacto, embora tenha grande influência na zona de liquefação na fase de consolidação. Após o início da consolidação do solo, a zona liquefeita reduz a sua extensão e inclusive um solo com menor condutividade hidráulica pode atingir o estágio de liquefação mais facilmente que um solo com maior condutividade hidráulica.

2.5 FORMAÇÃO DE CRATERAS – CARACTERÍSTICAS E FORMULAÇÕES EMPÍRICAS

Quando o martelo compactador com uma determinada massa cai de uma certa altura, ele atinge a superfície do solo com uma determinada energia de impacto, que por sua vez produz

uma variação volumétrica no solo, no ponto impacto, sendo ela uma deformação plástica denominada de cratera, recalque ou subsidência induzida (Mayne *et al.*, 1984). A profundidade da cratera tem sido usada como uma indicação do grau de melhoria das propriedades do solo aliado ao controle e monitoramento da compactação. (SOUZA JUNIOR e PASQUAL, 2021)

A profundidade de melhoramento é obtida em função de investigações geotécnicas e essa melhoria é atingida quando as deformações no solo reduzem conforme há o aumento dos golpes. Supõe-se que se atingiu a melhoria máxima para aquele determinado nível de energia (relação altura de queda e massa do martelo).

2.5.1 Relação entre o número de golpes a profundidade da cratera

Uma vez que as colunas de substituição dinâmica são criadas pelo princípio da compactação dinâmica, o entendimento da evolução da cratera é fundamental para especificar o projeto de reforço do solo. Mayne *et al.* (1984) estudaram 124 locais diferentes de solos (50% areia ou areia siltosa colocada hidraulicamente; 27% continham silte, argila ou aterro argiloso; doze locais continham resíduos de entulho, aterros de resíduos diversos e aterros sanitários). Em seus estudos muitos fatores importantes não puderam ser avaliados, tais como: (1) Efeito dos níveis de água subterrânea; (2) teor de finos no solo; (3) período de espera para testes de verificação; e (4) formato de peso, materiais de construção, dimensões etc. Embora, Rollins e Kim (2010) demonstrassem que em solos colapsíveis com diferentes teores de umidades fossem constituídas diferentes curvas de número de golpes *vs* profundidade de cratera.

A priori foi realizado um estudo de subsidência induzida (formação de crateras no solo pós-compactação), que em materiais não saturados acima do nível do lençol freático, isso ocorre de forma relativamente rápida, enquanto em solos saturados abaixo do lençol freático, a subsidência ocorre mais lentamente, à medida que as pressões cíclicas dos poros se dissipam com o tempo. Como a energia é aplicada a pontos em uma grade pré-selecionada, as manifestações mais óbvias dessa subsidência são as crateras relativamente grandes induzidas em cada ponto. A Figura 10 ilustra a resposta de formação de crateras em variados tipos de solos pelos EUA e no mundo em função da quantidade de golpes ocorridos, inclusive no solo laterítico de Passo Fundo/RS.

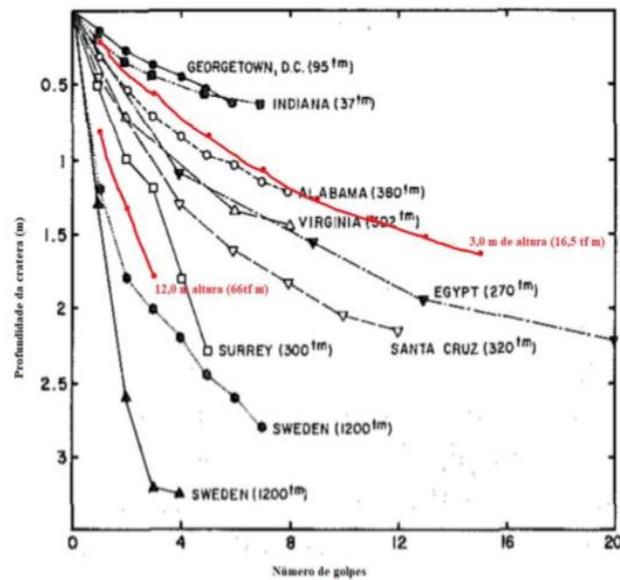
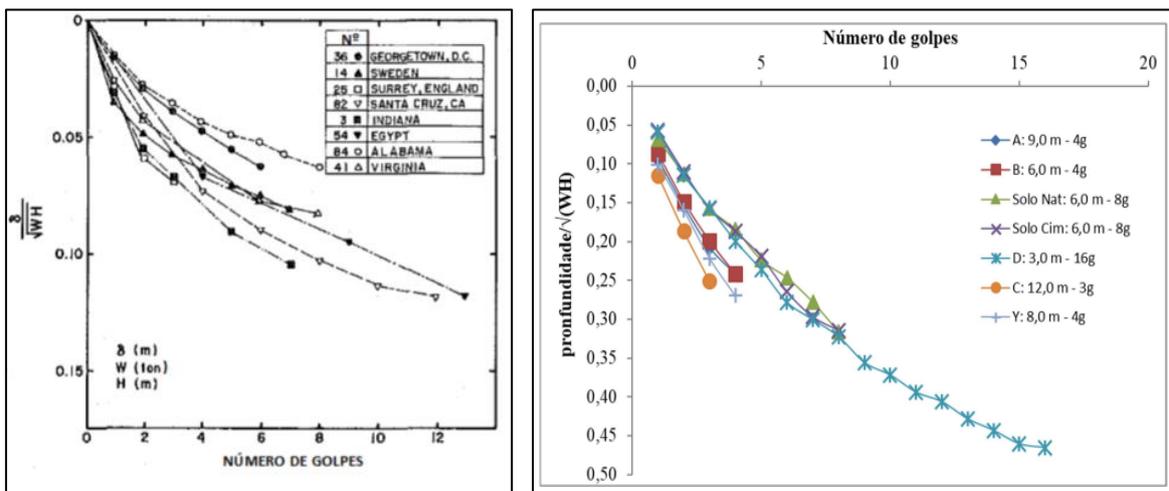


Figura 10 – Relação entre a formação da cratera e o número de golpes ocorridos no solo. (Fonte: Mayne *et al.*, 1984 modificado por Giese (2019))

Além do estudo anterior, convém estudar o comportamento normalizado de evolução de cratera do solo em função dos golpes. Com isso é possível estabelecer um gráfico normalizado para comparar a eficiência de equipamentos com diferentes energias, através de queda livre ou à com cabos (GIESE, 2019), como também equipamentos *RIC*. Abaixo, na Figura 11, estão ilustradas as crateras normalizadas de diferentes solos pelo mundo como também o do solo laterítico argiloso de Passo Fundo/RS.



(a)

(b)

Figura 11 – Formação de cratera normalizada: a) Variados tipos de solos pelo mundo (Fonte: Mayne *et al.*, 1984); b) Solo laterítico de Passo Fundo/RS. (Fonte: Giese, 2019)

O controle da variação da cratera em função da energia representa uma maneira de averiguar a eficácia do melhoramento, assemelhando-se ao controle geralmente feitos em estacas profundas através da “nega”. (SOUZA JUNIOR e PASQUAL, 2021). Mayne *et al.* (1984) afirmaram também que as medições de crateras podem ser usadas para selecionar o número ideal de golpes e estimar a subsidência média da área causada pelo processo de compactação dinâmica. Além disso, um resumo das profundidades da cratera plotadas em uma planta do local ajuda a reconhecer áreas anômalas que requerem tratamento adicional ou possível redução.

2.5.1.1 Formulações e coeficientes empíricos da profundidade de influência

De uma forma geral, a profundidade de melhoria efetiva é típica em torno de 10 m (ou mais com equipamentos e pesos muito grandes). A maior melhoria geralmente ocorre entre 3 e 8 m abaixo da superfície do solo, com graus decrescentes de melhoria em profundidades maiores. As camadas superficiais (superfície de aproximadamente 1 a 3 m) devem ser recompactadas devido ao rompimento pelas cargas de impacto e falta de confinamento suficiente. (NICHOLSON, 2015)

Mitchel (1980) afirmou que a definição da profundidade da influência é em si subjetiva e depende tanto do método de medição quanto da definição do que constitui uma melhoria mensurável do solo, ressaltando que é inconsistente avaliar em termos de energia de impacto. O tipo de solo pode ser declarado o parâmetro mais importante, sendo a queda do peso em guindaste considerada ineficiente quando comparada a uma queda livre, uma vez que há perdas por atrito estático e dinâmico nos cabos durante a queda do peso. A presença de camadas moles tem uma influência de amortecimento nas forças dinâmicas.

Mayne *et al.* (1984) afirmaram que a profundidade de influência constitui um parâmetro importante na seleção adequada do guindaste e do martelo de compactação, uma vez que a mobilização desses itens tem um impacto significativo no custo e na logística dos equipamentos. Na Tabela 1 estão elencadas variadas formulações de profundidade de melhoria realizadas ao longo dos anos por diversos pesquisadores.

Mayne *et al.* (1984) salientaram que a aplicação da compactação dinâmica na superfície do solo é limitada em seus efeitos nos solos abaixo da superfície. Menard e Broise (1975) sugeriram que a profundidade de influência é tão grande quanto à raiz quadrada do produto de peso, e altura de queda ou energia por golpe, conforme sua equação expressa na Tabela 1. Vários pesquisadores modificaram essa expressão em função do tipo de solo, eficiência do guindaste e nível de energia a partir do η na mesma tabela.

Tabela 1 – Relação de equações de profundidade de melhoria do solo desenvolvidas por diversos pesquisadores. (Fonte: Própria, 2020)

Autores	Equações
Menard e Broise (1975)	$WH > D^2$
Mitchel (1981) Mayne <i>et al.</i> (1984) com base em Menard e Broise (1975)	$D = \eta_{DC} \sqrt{WH}$
Varaksin (1981) ²	$D = c_e \cdot \alpha_s \sqrt{WH}$ $c_e = 0,9$ para guindastes de cabos /1,2 para queda livre $\alpha_s = 0,3$ e $0,7$
Charles <i>et al.</i> (1981)	$D = 0,4 \sqrt{\frac{E_d \cdot D_m}{A \cdot S_u}}$
Smits e De Quelerij (1989)	$DI = \frac{W}{A \rho_{max}} \left[-1 + \sqrt{\left(\frac{\sigma_e + \alpha_d V_0^2}{\sigma_e} \right)} \right]$
Luongo (1992)	$D = K_1 + K_2 (WH)$
Slocombe (1993)	$D = 0,586 \sqrt{WH} - 0,009(WH)$
Vuola and Hartikainen (1999)	$D = f_c f_m f_b \sqrt{WH}$ $f_c = 0,8$ a $0,9$ $f_m = 0,65$ a $0,75$ para areias saturadas $f_b = 1,5$ a $2,0$
Fei <i>et al.</i> (2002)	$D = \sqrt{w^{\frac{2}{3}} \cdot H \cdot N \cdot [dcr \cdot \rho_d (1 - \bar{w})]^{-1}}$
Ghassemi <i>et al.</i> (2008)	$D = 2 (WHR)^{0,25}$
Hajjalilue-Bonab e Razaei (2009)	$D = 3,1Dc + 1,75Dm$
Mohammed <i>et al.</i> (2010) ¹	$D = \eta \sqrt{WHN}$

Obs₁: Fórmula obtida através de estudos realizado em *rapid impact compaction* *;

Obs₂: Chu *et al.* (2009) comentaram que a formulação de Varaskin⁶(1981) e é baseada no refinamento gerado em torno do η_{DC} , e discrimina o valor c_e em: 1, para queda livre; 0,89 para queda de equipamento; 0,75, para guincho mecânico; 0,64, para guincho hidráulico; e 0,5 para guincho hidráulico duplo. Quanto aos solos, $\alpha_s = 0,9$ para solos metaestáveis, preenchimentos recentes (não consolidados) ou aterros hidráulicos muito recentes; e $\alpha_s = 0,4$ a $0,6$ para areias.

Feng *et al.* (2011) explicaram que o valor η consiste na calibração da formulação de Menard e Broise (1975) para diferentes condições de compactação dinâmica e tipos de solos. Lukas (1995) enfatizou que a variação do η_{DC} se deve aos seguintes fatores: eficiência do mecanismo

⁶Varaksin, S. (1981). *Recent development in soil improvement techniques and their practical applications*. Sols/Soils, Techniques Louis Menard, 15, rue des Sablons, Paris, pp. 38-39.

de queda do guindaste, quantidade total da energia aplicada, tipo de depósito de solo que está sendo densificado, presença de camadas absorventes de energia, presença de uma camada resistente acima ou abaixo do depósito sendo compactado e pressão de contato do peso. A Tabela 2 apresenta os valores de η_{DC} por diversos pesquisadores em variados solos estudados pelo mundo.

Tabela 2 – Valores de coeficientes empíricos η obtidos por diversos autores em diversos sites pelo mundo (Fonte: Própria, 2021)

Autores	η_{DC}	Solos
Leonard, <i>et al.</i> (1980)	0,5	Granulares
Smoltczyk (1983) ⁷	0,67	Areias e Siltes
Mayne <i>et al.</i> (1984)	0,3 - 0,8	Variados solos
Qyian (1987) ⁸	0,65	Areias finas
Van Impe (1989) ⁹	0,65	Siltes arenosos
	0,5	Argilas Arenosas
Rollins e Rogers (1994)	0,4	Colapsíveis
Rollink e Kim (2010)	0,4 - 0,5	Areias siltosas secas
Lukas (1995)	0,5	Depósitos de solos permeáveis com elevado grau de saturação
	0,5 - 0,6	solos granulares com baixo grau de saturação
	0,35 - 0,40	Depósitos semipermeáveis de solos siltosos com IP <8 e alto grau de saturação
	0,40 - 0,50	Depósitos semipermeáveis de solos siltosos com IP <8 e baixo grau de saturação
	0,35 - 0,40	Depósitos impermeáveis de argilas com IP >8 e baixo grau de saturação
Van Impe e Bouozza (1996)	0,35 - 0,65	Depósitos de materiais fofos
Yasrobi e Asghari (2004)	0,35 - 0,40	Resíduos sólidos
Feng <i>et al.</i> (2011)	0,3	Solos pedregulhosos (Irã)
Shui <i>et al.</i> (2006)	0,38	Depósitos granulares na China
Ghassemi <i>et al.</i>	0,4 - 0,65	Aterro com entulho e silte
Giese (2019)	0,5	Areias
		Solo laterítico de Passo Fundo/RS - Brasil

⁷Smoltczyk, U. (1983) “Deep compaction: general report.” *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, n° 1, pp. 1105–1116.

⁸Qian J. H.(1987) “Dynamic consolidation: from practice to theory.” *Proceedings 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Kyoto, n° 1.

⁹ Van Impe, W. F.(1989) *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. Balkema, Rotterdam.

2.5.1.2 Modelagem da zona compactada com base em experimentos

Após o impacto do martelo, naturalmente forma-se um bulbo de solo compactado. O entendimento deste bulbo formado é fundamental para compressão da melhoria gerada no solo. Póran e Rodriguez (1992) modelaram as curvas de contorno do solo após à compactação (ver a Figura 12) é compararam com as deformações plásticas volumétricas geradas experimentalmente. Estes contornos de deformação foram calculados a partir da relação entre os contornos da densidade final no final de cada fase da compactação dinâmica em relação à densidade inicial em estudos realizados com areias.

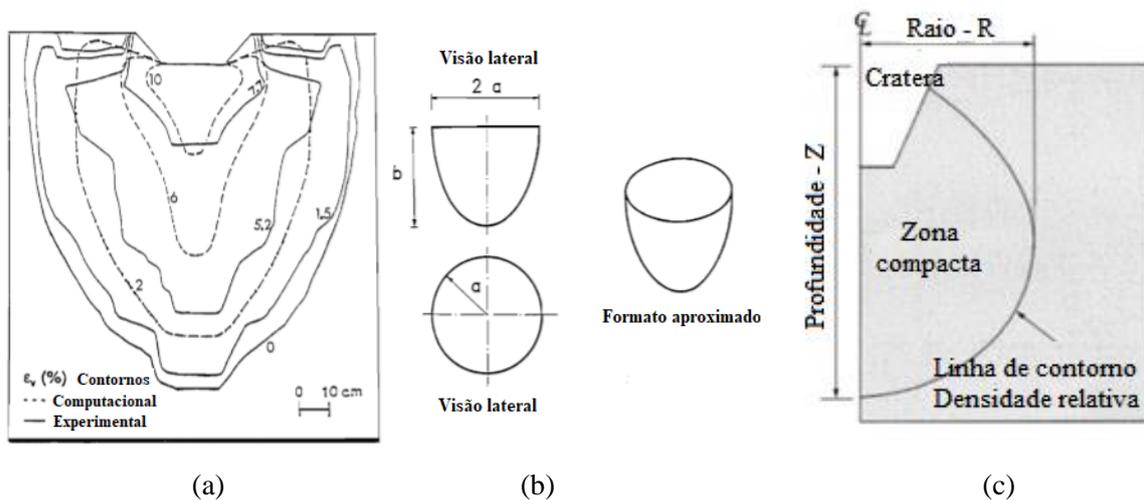


Figura 12 – Extensão dos bulbos compactados: a) contorno computacional e experimental dos bulbos compactados; b) formato aproximado das profundidades melhoradas após a compactação dinâmica (Fonte: Póran e Rodriguez, 1992); c) formato simplificado. (Fonte: Oshima e Takada, 1997)

Com base nesses resultados, aparentemente os volumes de contornos de densidade podem ser aproximados a geometrias de um semi-elipsoíde de revolução com concavidade para cima apresentando dimensões de a e b , para os raios pequeno (horizontal) e grande (vertical), respectivamente, como mostrado na Figura 12a e Figura 12b. O programa de ensaios em laboratório utilizado para investigar a resposta ao impacto da areia seca seguiu os critérios

mencionados por Heh¹⁰ (1990) e Porán *et al.*¹¹ (1991). As relações geométricas dos contornos da compactação dinâmica para os diferentes estágios de compactação foram calculadas a partir dos parâmetros a e b medidos a com base no centro da superfície original do solo, acima do centro da base da cratera induzida pela compactação dinâmica.

Além disso, foram determinadas as relações entre a energia específica total normalizada e as relações normalizadas R_c/D_m e D_c/D_m para os diferentes contornos de densidade relativa (deformação volumétrica) dentro da massa de areia. (PORÁN E RODRIGUEZ, 1992) A equação (3) informa a razão volumétrica da profundidade (D_c/D_m) em função da energia específica total normalizada, ajustadas com relações semi-log:

$$\left(\frac{D_c}{D_m}\right) = j + K \log\left(\frac{N.W.H}{A.D_c}\right) \quad (3)$$

A equação (4) informa a razão volumétrica de raio (R_c/D_m) em função da energia específica total normalizada ajustadas com relações semi-log:

$$\left(\frac{R_c}{D_m}\right) = 1 + m \log\left(\frac{N.W.H}{A.D_c}\right) \quad (4)$$

Oshima e Takada (1997) estudaram a área de extensão do bulbo compactado com auxílio de modelos reduzidos em areias através de mudanças de densidades relativas do solo. Observou-se que as extensões apresentavam contornos similares aos apresentados por Porán e Rodriguez (1992). As equações (04) e (05) descrevem os limites da área compactada, em queda livre ($V_o = \sqrt[2]{2gh}$), através de Z (Profundidade de melhoria) e do R (Raio de atuação) com base na ilustração da Figura 12c.

$$Z = a_z + b_z \log(MV_oN) \quad (5)$$

$$R = a_R + b_R \log(MV_oN) \quad (6)$$

¹⁰Heh, K.S. (1990) “*Dynamic compaction of sand.*” Ph.D. dissertation, Civil Environmental Engineering Department, Polytechnic University, Brooklyn, N.Y.

¹¹Poran, C.J., Heh, K.S., and Rodriguez, J.A. (1991) “Impact response of granular soils.” *Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, MO., vol. 2, s/nº, pp. 1387-1398.

Du *et al.* (2019) desenvolveram um modelo computacional baseado na teoria do meio estocástico para deduzir a quantidade de deformação no preenchimento a partir da geometria da cratera de compactação dinâmica. Para este modelo, o sistema do martelo-solo foi simplificado para uma geometria axissimétrica e a probabilidade de deformação do material abaixo da cratera se tornou possível de ser calculada. A equação 7 com acoplamento da equação (8) expressa a formulação da formação da cratera em coordenadas cilíndricas com no modelo da Figura 13 a.

$$W(x, z) = \eta_p \int_0^{D_c} \int_0^{\rho(\zeta)} \int_0^{2\pi} \frac{\tan^2 \beta}{(z-\zeta)^2} \exp\left(-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\rho \cos \theta_c)^2 + (\rho \cos \theta_c)^2}{(z-\zeta)^2}\right) \rho d\theta_c d\rho d\zeta \quad (7)$$

cujo:

$$\rho(\zeta) = \rho(1) + \frac{(\rho(2)-\rho(1))\zeta}{D_c} \quad (8)$$

Com base na Figura 13b, obtém-se:

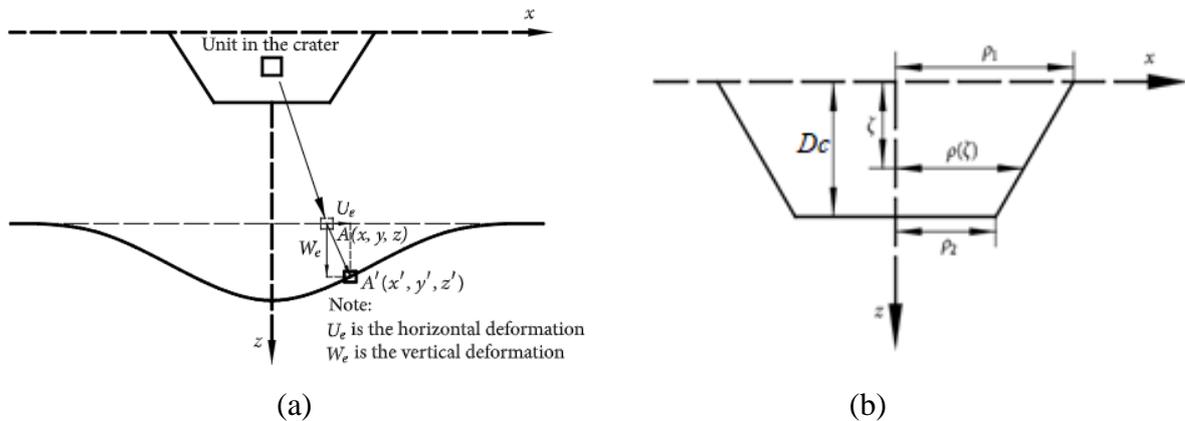


Figura 13 – Modelo estocástico de evolução de cratera e profundidade de melhoramento: a) Diagrama de deformação em ponto; b) seção transversal idealizada da compactação dinâmica. (Fonte: Du *et al.*, 2019)

Mullins *et al.* (2000) desenvolveram um método semiempírico de previsão de profundidade de cratera de compactação dinâmica com base no 1º golpe com base na Figura 14. O método proposto correlaciona dados de resistência ao cisalhamento do solo compactado obtidos por meio de CPT com a energia de impacto específica (E) dada pela equação (9):

$$E = \eta_r \frac{WH}{A} \quad (9)$$

Tomando como base que para a formação da cratera, Mullins *et al.* (2000) consideraram que a energia necessária para a formação cratera depende de superar a resistência do solo em função de uma determinada área de contato e da mobilização da resistência ao cisalhamento em uma determinada área. A combinação das equações 10 e 11 unidas permitem a estimativa desta profundidade com base na Figura 14a.

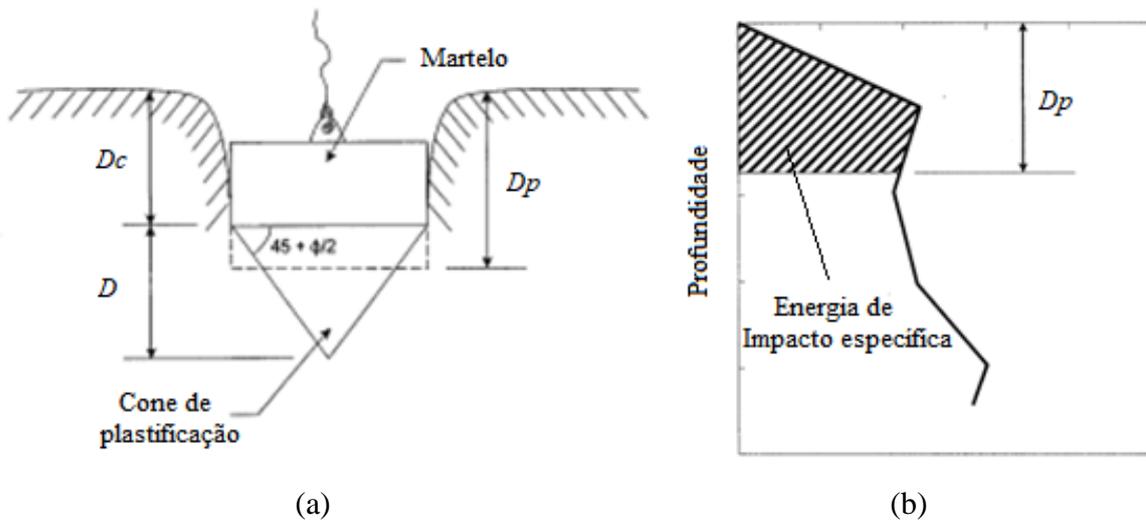


Figura 14 – Modelo semiempírico de profundidade efetiva do solo após compactação dinâmica: a) Diagrama de desenvolvimento da cunha plástica; b) Penetração calculada em função da energia específica. (Fonte: Mullins *et al.*, 2000)

$$D_p = D_c + \frac{D}{3} \quad (10)$$

$$h = \frac{Dm}{2} \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (11)$$

2.5.2 Melhoramento em profundidade da cratera

Lukas (1995) anunciou faixas de valores máximos de SPT, CPT e PMT que foram medidos após a compactação dinâmica referenciada na Tabela 3. Rizzon (2016) atingiu um padrão de densificação estimado de melhoria abaixo da cratera de 3,30 m nos solos coesivos friccionais de Passo Fundo/RS, utilizando peso com 1,20 m de diâmetro.

Tabela 3 – Valores de resistência ao cisalhamento por tipo de solo medidos após a compactação dinâmica (Fonte:Lukas,1995)

Tipo de solo	Valores máximo		
	Nspt	q _c (MPa)	P _{LM} (MPa)
Solo de granulometria contínua:			
Areias e Pedregulhos	40 - 50	19 - 29	1,9 - 2,4
Solos intermediários:			
Siltes arenosos	34 - 45	13 - 17	1,4 - 1,9
Siltes e argilas siltosas	25 - 35	10 - 13	1,0 - 1,4
Depósitos parcialmente saturado impermeável:			
Aterro de argila e minas intemperizadas	30 - 40*	N/A	1,4 - 1,9
Aterros	20 - 40*	N/A	0,5 - 1,0

*Valores mais altos de teste podem ocorrer devido a partículas grandes na massa do solo.

A melhoria média ao longo da profundidade do solo era menor que o valor máximo. A melhoria máxima geralmente ocorre a uma profundidade de 1/2 a 1/3 da profundidade máxima de melhoria, como mostrado na Figura 15. (LUKAS, 1995)

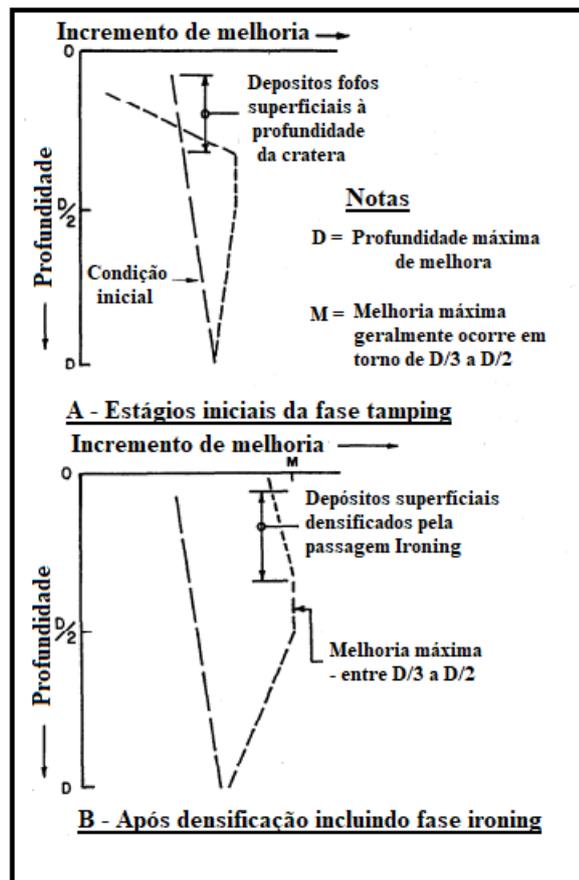


Figura 15 – Variação do melhoramento do solo em função da profundidade durante a compactação dinâmica. (Fonte:Lukas,1995)

Ghanbari e Hamidi (2015) usaram o método elementos finitos através do *software* ABAQUS® para avaliar a influência da inclinação do talude (45°, 60°, 75° e 90°) nos parâmetros do solo. E concluíram que na medida em que a distância de compactação do salto de inclinação aumenta, os valores da profundidade da cratera diminuem gradualmente até atingir os valores dos modelos planos (sem inclinação). Constatando assim que os efeitos das inclinações reduzem gradualmente. A comparação dos modelos com diferentes inclinações indicou que os valores da profundidade da cratera em inclinações mais íngremes são muito mais altos.

2.5.2.1 *Melhoramento lateral da cratera*

Lukas (1995) afirmou que na presença de estradas ou de sistemas públicos enterrados (abastecimento de água, sistema de esgoto, energia elétrica, GLP) próximos ao ponto de impacto, a probabilidade de deslocamentos permanentes do solo deve ser considerada.

Em avaliações de 3 locais do projeto com 3 solos distintos (rejeito de mineração, areia siltosa fina e areia fofa) que foram instrumentados com tubos-guias localizados a distâncias de 3,0 e 6,1 m do ponto de impacto foram medidos com inclinômetros. A uma distância de 3 m do ponto de impacto, foram obtidos deslocamentos laterais entre 152 a 318 mm e estes foram medidos dentro da zona de 6,1 m abaixo do nível. Quanto à distância de 6,1 m do ponto de impacto, os deslocamentos laterais do solo foram da ordem de 19 a 76 mm. (LUKAS,1995)

Giese (2019) realizou 4 avaliações em 4 pontos de estudo de deslocamento com uso de inclinômetro no solo laterítico de Passo/RS, obtendo como como deslocamento máximo o valor de 85 mm com 16 golpes de 3m, conforme Figura 16. Nos demais pontos onde foram realizados 4 golpes de 6 m, 4 golpes de 9 m e 3 golpes de 12 m medidas de 54 mm, 40,6 mm e 72 mm, respectivamente. Como pode ser visto, a energia de queda do peso influencia muito que a frequência de golpes.

Hajjalilue-Bonab e Zare (2014) com uso de *PIV* em estudos de modelos físicos observaram que o ângulo dos vetores de deslocamento pode ser usado para estudar a orientação dos elementos do solo durante a compactação, conforme Figura 17. A Figura 17a ilustra e imagem de velocimetria das partículas os deslocamentos das partículas ao peso compactador interceptando o solo, já a Figura 17b apresenta o comportamento de deslocamento após dois martelos caírem concomitantemente. Os ângulos dos vetores diminuem à medida que se afastam do ponto de compactação e, com o incremento da distância, os ângulos dos vetores se

elevam novamente. Com o aumento da profundidade ocorre redução dos efeitos dos impactos, consequentemente, a magnitude da variação dos ângulos do vetor de deslocamento é reduzida e as curvaturas das curvas diminuem. Em última análise, em profundidades maiores que $3D_m$, a curva se aproxima de uma linha horizontal.

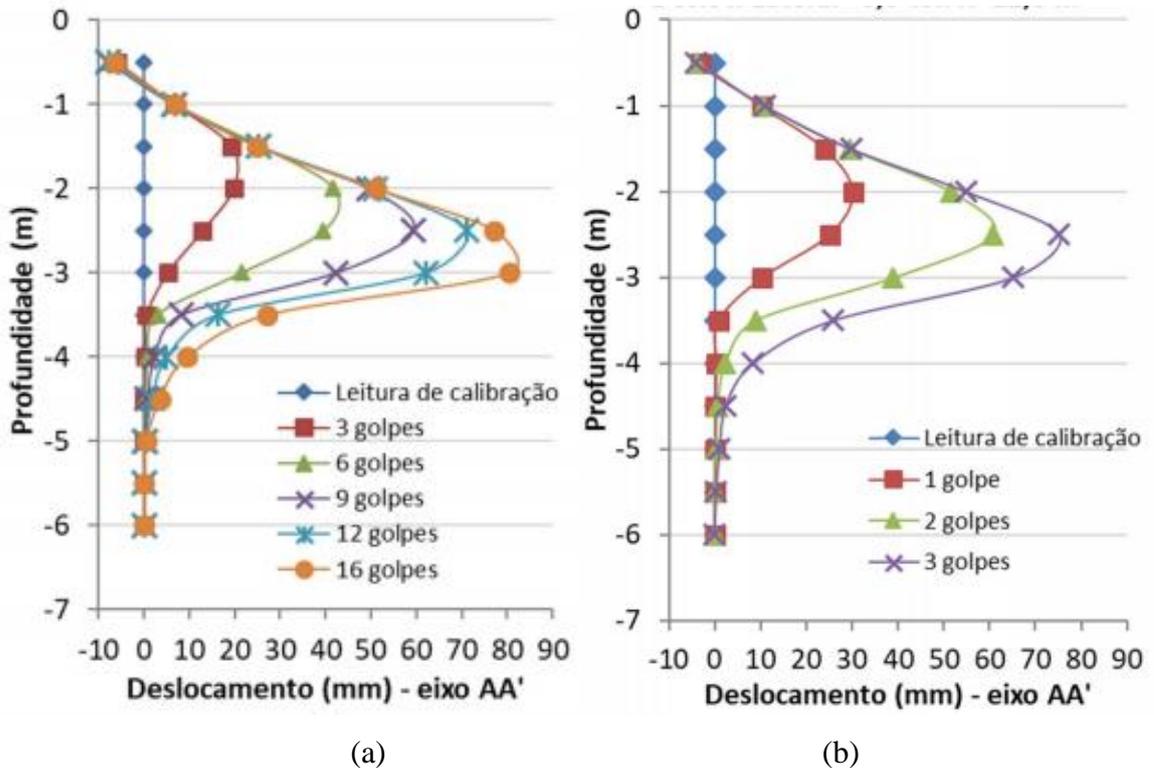


Figura 16 – Deslocamentos laterais medidos pela compactação dinâmica a 60cm de distância do martelo: a) a 3,0 m de altura com 5,5 tf; b) 12m de altura com 5,5 tf. (Fonte: Giese, 2019)

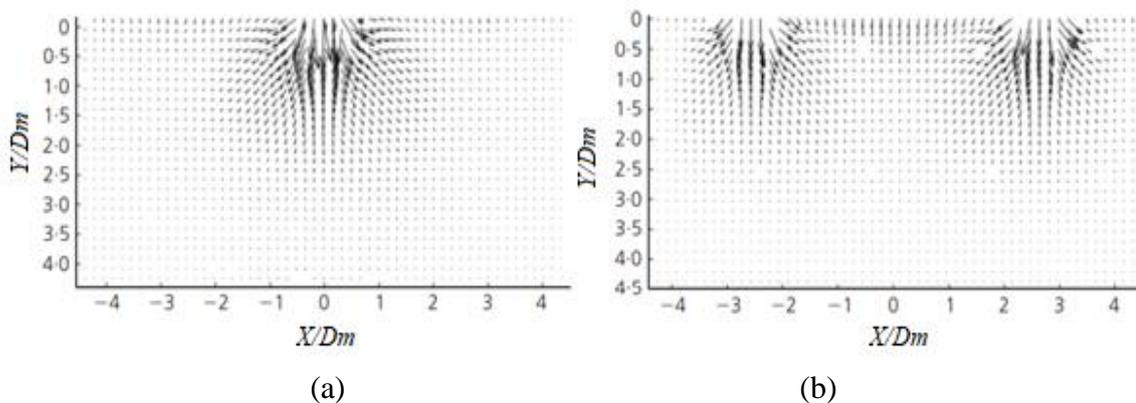


Figura 17 – Deslocamentos de solos após o contato do peso com o solo: a) Martelo de compactação simples; b) com distância de compactação de $5D_m$. (Fonte: Hajjalilue-Bonab e Zare, 2014)

2.5.3 Espaçamentos entre pontos de impacto, fases e quantidade de golpes

De maneira geral, a compactação dinâmica se subdivide em fase *tamping* (melhoria profunda e mais energia) e fase *ironing* (melhoria superficial com menor energia). Contudo, tecnicamente é pertinente dividi-la em três fases, sendo elas:

- a) Fase inicial (“*Print*”);
- b) Fase intermediária (“*Intermediate*”);
- c) Fase de passagem (“*Ironing*”)

Hamidi (2014) caracterizou as três fases afirmando que a fase inicial ou de *Print* é realizada em uma grade ampla com a quantidade máxima de energia de impacto ou golpes por ponto de impacto, cujo fundamento é tratar as camadas mais profundas do solo. A segunda fase (fase intermediária), que também é um tratamento profundo, destina-se a tratar os espaçamentos intermediários entre os pontos compactados na fase *Print* do solo, respeitando o processo de compactação “de fora para dentro” e permitir uma melhoria abrangente a partir da interseção dos bulbos de densificação.

Posteriormente se inicia a fase *Ironing*, que tem o objetivo de estabelecer o preenchimento e densificação com baixa energia de compactação acumulada (baixas alturas e poucos golpes) por ponto até atingir a cota de nível do terreno, desta forma ocorre a melhoria das camadas ocorrem das camadas mais superficiais do terreno até o fundo da cratera. Menard (2019) complementou explicando que após as fases de alto impacto ocorre a fase *ironing* representando etapa de nivelamento produzido por um martelo plano e ao fim a realização de compactação com rolo vibratório para conclusão do tratamento.

Mayne *et al.* (1983 *apud* HOMAN, 1985), Chow *et al.* (1994), Lukas (1995) afirmaram que para se atingir uma compactação eficiente, deve-se pensar adequadamente o espaçamento da energia aplicada e o intervalo de tempo entre as aplicações desta energia. O espaçamento dos pontos da grade pode ser estimado a partir da equação (12):

$$S = (WHN_B/U)^{0,5} \quad (12)$$

Lukas (1995) comentou que um espaçamento médio na faixa de 1 a 2 vezes o diâmetro ou largura do peso é comum. Nos solos de textura fina, no qual há uma preocupação de desenvolvimento de poropressão, deve-se prever duas ou mais fases. A primeira fase envolveria

a queda do peso alternando entre segundo ou terceiro local do ponto de queda. Após a dissipação da poropressão, as localizações intermediárias do ponto de queda poderiam ser densificadas como parte da segunda ou terceira fase. O mesmo autor também comentou que a quantidade de golpes de densificação é calculada em função de um espaçamento de grade variando de 1,5 a 2,5 vezes o diâmetro do peso.

Chow *et al.* (1994) apresentaram um método para avaliar o efeito do espaçamento na compactação dinâmica em solos granulares fofos, recentemente desenvolvido em conjunto com uma abordagem para prever a extensão lateral da melhoria do solo ao redor do martelo de compactação. Neste estudo foram desenvolvidas duas abordagens:

- a) Impacto de ponto único para previsão da extensão lateral da melhoria do solo ao redor do martelo de compactação;
- b) Impacto em pontos múltiplos para fins de projeto já que pontos mais críticos estão no centro da grade e no meio do lado da grade pois existe a influência significativa de impactos em pontos adjacentes ao ponto submetido à compactação.

Na abordagem de impacto único, Chow *et al.* (1994) usaram uma correlação de Meyerhof (1976) para estimar o φ' a partir dos valores do ensaio CPT e assim analisaram o aumento no ângulo de atrito ($\Delta\varphi$) do solo em distâncias variadas referenciadas pelo ponto de impacto do martelo de compactação. Os autores acima mencionados estabeleceram uma relação considerando a razão de ângulo de atrito ($\Delta\varphi / \Delta\varphi_b$) e em diferentes profundidades como pode ser visto Figura 18, com a razão de distância (X/D_m), na escala log, na qual X é medido a partir do centro do impacto e D é o diâmetro do martelo de compactação ou diâmetro equivalente com base na área de base igual, se o martelo for quadrado. Os dados da compactação dinâmica ilustrados no gráfico da Figura 18 foram baseados no estudo de caso experimental de Harada e Suzuki¹² (1984) complementados com dados de ponta de estacas e caixões informados no estudo de Meyerhof¹³ (1959).

Chow *et al.* (1994) afirmaram que o efeito da compactação dinâmica é bastante semelhante à compactação do solo sem coesão sob estacas e em perfis caixões. Como é observado na Figura 18, a razão de distância (X/D_m) se manteve constante em função da razão de ângulo de atrito ($\Delta\varphi / \Delta\varphi_b$) até 0,5, dando indícios de que a variação é inexistente em distâncias próximas do centro do martelo. Contudo, foi verificado que o nível de densificação do solo, como esperado,

¹²Harada, M. e Suzuki, M. (1984). "Improvement of sandy soil and measurement of soaking earth pressure by dynamic consolidation." *Proc., 16th Soil Engrg. Res. Seminar, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 1689-1692, (in Japanese).

¹³Meyerhof, G. G. (1959). "Compaction under impact." *J. of Soil Mech. and Found. Engrg.*, ASCE, 85(4), 1292-1323.

diminui progressivamente com o aumento da distância em relação ao centro do martelo de compactação, ponta da estaca ou caixão, valores de distância lateral na faixa de $3,5D_m$ geraria uma melhoria nula, ou seja, o elemento trabalharia de maneira autônoma.

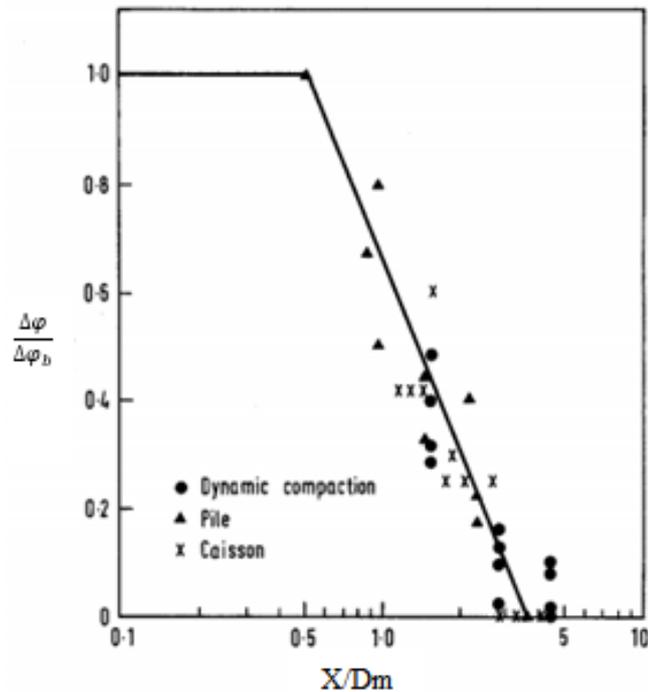


Figura 18 – Melhoramento do solo ao entorno do peso, pontos de estacas e caixões. (Fonte: Chow *et al.*, 1994)

Os autores afirmaram que após uma análise de regressão, a razão normalizada $\Delta\phi/\Delta\phi_b$ em uma dada distância lateral (X/D_m) longe do centro de impacto após a compactação dinâmica pode ser razoavelmente aproximada pelas equações (13), (14) e (15), que para fins práticos, são considerados independentes da profundidade:

$$\Delta\phi/\Delta\phi_b = 1,0, \text{ se } X/D_m \leq 0,5 \quad (13)$$

$$\Delta\phi/\Delta\phi_b = 0,642 - 1,180 \log (X/D), \text{ se } 0,5 < X/D_m \leq 3,5 \quad (14)$$

$$\Delta\phi/\Delta\phi_b = 0, \text{ se } X/D_m > 3,5 \quad (15)$$

Na avaliação em pontos múltiplos, as verificações foram feitas a partir da razão de distância (S/D_m). Os dados da proposição foram originados dos estudos dos solos de Kampung Pakar –

Malásia (Chow¹⁴*et al.*1992), Noshiro – Japão (Tanaka e Sasaki¹⁵, 1989) e Changi – Singapura (Choa¹⁶*et al.*,1979). Chow *et al.* (1994) citaram que as análises foram a partir da razão $S/D_m > 1$, pois quando $S/D_m \leq 1$ o centro da grade e o meio do lado da grade estão localizados diretamente abaixo do martelo de compactação, cujas razões de ângulo de atrito são assumidas como tendo valores de 1,0. Nos pontos centrais ($\Delta\phi_c/ \Delta\phi_b$), conforme a Figura 19a, estão apresentadas as equações (16) e (17).

$$\Delta\phi_c/ \Delta\phi_b = 1,0, \text{ se } S/D_m \leq 2,1 \quad (16)$$

$$\Delta\phi_c/ \Delta\phi_b = 1,60 - 0,29(S/D_m), \text{ se } 2,1 < S/D_m \leq 5,5 \quad (17)$$

Da mesma forma, na Figura 19b, o efeito do espaçamento de “Print” em pontos intermediários a razão $\Delta\phi_m/ \Delta\phi_b$ pode ser aproximada usando as equações (18) e (19) para propósitos de projeto através da $\Delta\phi_c/ \Delta\phi_b$ que é a razão de ângulo de atrito.

$$\Delta\phi_m/ \Delta\phi_b = 1,0, \text{ se } S/D_m \leq 2,1 \quad (18)$$

$$\Delta\phi_m/ \Delta\phi_b = 1,49 - 0,23(S/D_m), \text{ se } 2,1 < S/D_m \leq 6,5 \quad (19)$$

Na Figura 19, as curvas propostas obtiveram comportamentos próximos aos dos gráficos de impacto em ponto único, apresentando apenas leves distorções. Chow *et al.* (1994) demonstraram através das duas curvas características, que há pouca densificação do solo em regiões do centro e do meio de cada lado de uma grade quadrada, caso os espaçamentos da fase *Print* excederem 5,5 e 6,5 diâmetros, respectivamente.

¹⁴Choa, V., Karunaratne, G. P., Ramaswamy, S. D., Vijiaratnam, A., e Lee, S. L. (1979). "Compaction of sand fill at Changi Airport." *Proc., 6th Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Southeast Asian Society of Soil Engineering*, 137-140.

¹⁵Tanaka, S. e Sasaki, T. (1989). "Sandy ground improvement for liquefaction at Noshiro Thermal Power station." *Soils and Found.* Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, Ser. 374, Vol. 37, n° 3, 86-90, (in Japanese).

¹⁶Choa, V., Karunaratne, G. P., Ramaswamy, S. D., Vijiaratnam, A., e Lee, S. L. (1979). "Compaction of sand fill at Changi Airport." *Proc., 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Found. Engineering*, Southeast Asian Society of Soil Engineering, pp. 137-140.

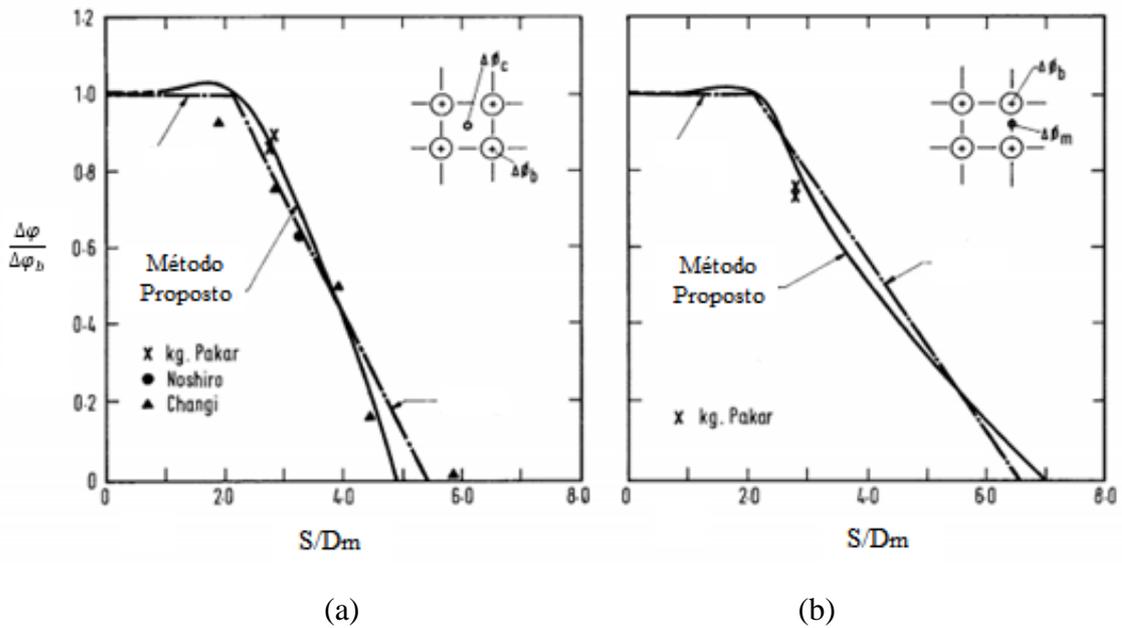


Figura 19 – Curvas de projeto para seleção de espaçamento (*Print*) através da compactação dinâmica: (a) centro; (b) meio de um lado. (Fonte: Chow *et al.*, 1994)

Hajjalilue-Bonab e Zare (2013) obtiveram relações de espaçamentos próximas ao dos estudos de Chow *et al.* (1994). Hajjalilue-Bonab e Zare (2013) avaliaram o efeito da compactação do espaço e padrão na compactação dinâmica a partir de um modelo físico com depósito de areia seca em estado fofo (técnica da chuva de areia) com técnica *PIV*. Como pode ser observado na Figura 20, o espaço de compactação com 4 D_m em função do incremento da D_r e a razão da profundidade com o diâmetro do peso compactador (Y/D_m) praticamente se equipara a relação 3 D_m , que em termos de eficiência é o mais representativo.

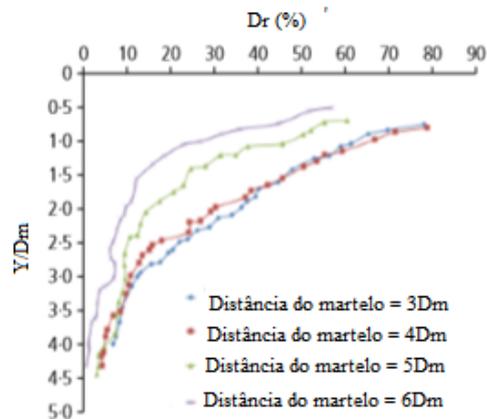


Figura 20 – Aumento de D_r entre os pontos de compactação. (Fonte: Hajjalilue-Bonab e Zare, 2014)

O incremento da D_r resultou na diferença entre a densidade relativa inicial e a densidade relativa obtidas a partir dos pesos específicos máximos e mínimos em laboratório da areia. Abaixo (ver a Figura 21) ilustra as deformações ocorrentes no solo, a partir da técnica de imagem de velocimetria das partículas, nota-se que o valor de espaçamento $4 D_m$ é próximo do limite da sobreposição dos bulbos compactados.

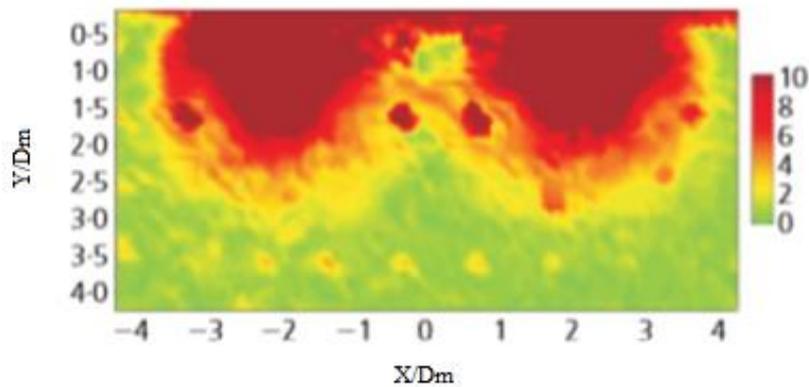


Figura 21 – Deformações ocorridas no solo do modelo com peso de diâmetro $4D_m$ na compactação dinâmica. (Fonte:Hajjalilue-Bonab e Zare, 2014)

Kooshari *et al.* (2016) afirmaram que os solos compactados com alta energia, uma vez que obedecem ao espaçamento ótimo da *grid*, levará à obtenção de resultados representativos de melhoria, ou seja, ao aumentar o espaçamento da *grid*, a profundidade de melhoria relativa diminuirá. Desta forma, concluíram que um espaçamento de *grid* de 6 a 7 m combinados a energias de compactação moderada a alta levarão a uma maior profundidade de compactação, com base no método *Fuzzy* e *PSO*.

Feng *et al.* (2011) informaram que utilizando o procedimento original da compactação dinâmica em etapas (*area compaction* e *Ironing compaction*) para os solos da Baía de Daya, na China, foram determinados os espaçamentos entre pontos de impacto na faixa de 3 m (de 1ª e 2ª passadas quanto nas 3ª e 4ª passadas) em solo cuja estratigrafia apresentava aterro, camadas de silte e pedregulhos, conforme Figura 22a.

O'Brien e Guptan (1984) utilizaram um espaçamento entre pontos de passadas de 15 m nas direções horizontais e verticais, com distâncias de 10,6 m no sentido diagonal. Em Bangladesh e na Espanha, onde as áreas do *grid* foram melhoradas por pesos de 15 a 18 toneladas, por meio de guindastes em esteiras, a alturas de 25 a 28 metros, conforme Figura 22b.

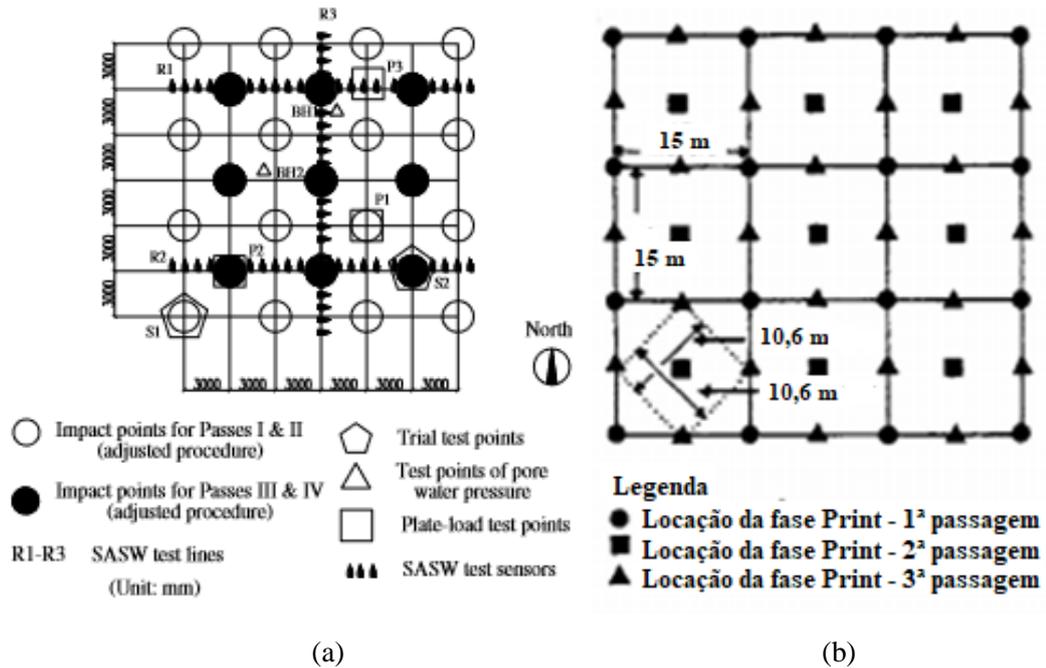


Figura 22 – Grid de compactação: a) projeto da baía de Daya na China (Fonte: Feng *et al.*, 2011); b) plantas de Bangladesh e na Espanha. (Fonte: Ó’Brien e Guptan, 1984)

2.5.4 Subdivisão categórica dos solos

Para que a densificação ocorra de forma eficaz, é necessário que o depósito seja relativamente permeável, de forma que o excesso de poropressão que se desenvolve durante a densificação, dissipe-se em um período, permitindo assim que as partículas do solo se movam para um estado de empacotamento mais denso. Portanto, os depósitos de solo mais favoráveis para a compactação dinâmica são aqueles em que a permeabilidade da massa do solo é alta, logo drenante. (LUKAS, 1995)

Desta forma, na literatura há uma proposta de categorização de solos viáveis para aplicação da compactação dinâmica, subdivida em três zonas de classificação distintas, dependendo da granulometria, índice de plasticidade e condutividade hidráulica, ilustrada na Figura 23. Estas zonas foram arranjadas, de forma qualitativa, do “pior ao melhor” tipo de solo. Quanto à descrição destes solos, podem ser feitas as seguintes considerações:

- Zona 1: denominada de zona de solos mais favoráveis, é representada pelos depósitos granulares permeáveis, que incluem desde areias e cascalhos naturais, como também entulho de construção, entulho de mina, determinados resíduos industriais (Ex: escória) e depósitos de lixo decompostos;

- b) Zona 2: denominada de zona de solos intermediários, composta por sedimentos, siltes argilosos e os siltes arenosos, cujos solos possuem uma condutividade hidráulica da ordem de 10^{-5} a 10^{-8} m/s. Devido a estes tipos de solos possuírem uma permeabilidade menor que a desejada, a energia deve ser aplicada usando múltiplas fases ou múltiplas passagens, considerando um tempo suficiente entre as fases ou passagens para permitir dissipação do excesso de poropressão;
- c) Zona 3: denominada de zona de solos não favoráveis, composta por solos argilosos, naturais ou de aterro, em estado saturado, principalmente em condições normalmente adensados. Em depósitos saturados, naturalmente não ocorrem, a menos que o teor de umidade do depósito seja reduzido. Geralmente, os solos argilosos têm permeabilidades menores que 10^{-9} m/s, portanto, a dissipação do excesso da poropressão gerada durante a compactação dinâmica não ocorre instantaneamente, mas ao longo do tempo.

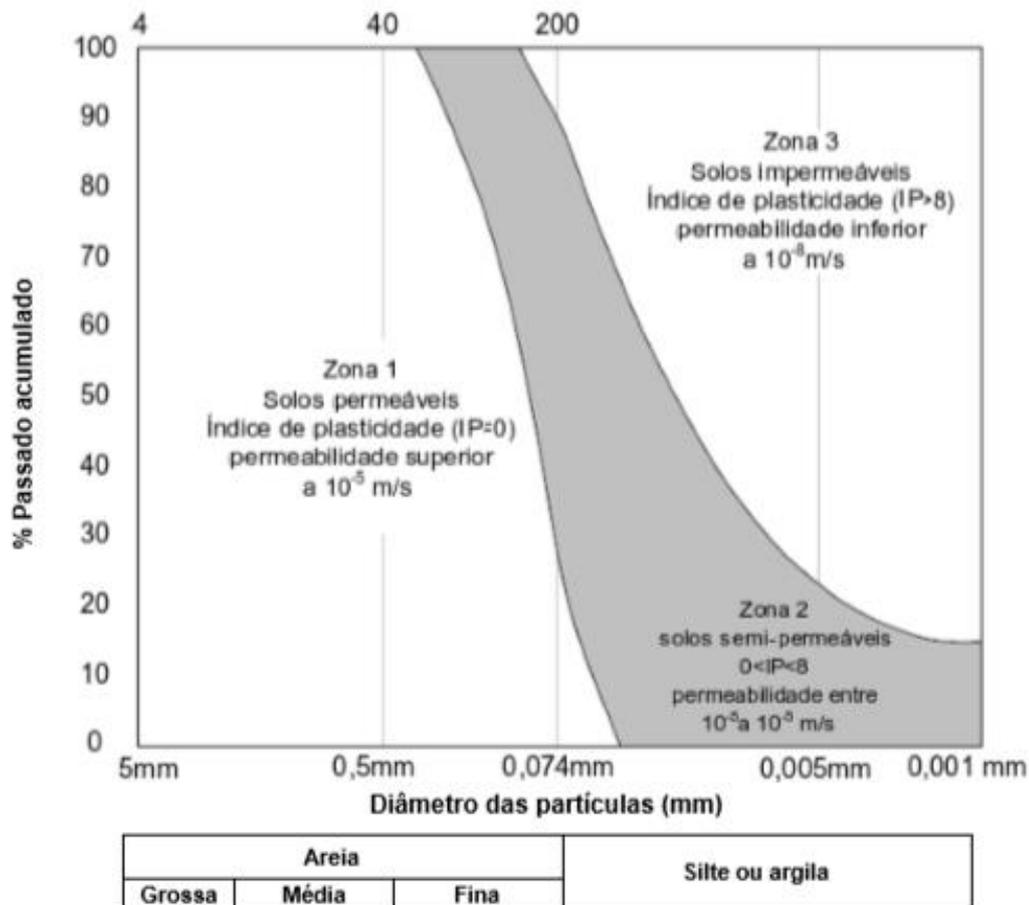


Figura 23 – Zoneamento dos tipos de solos úteis na compactação dinâmica a partir das suas propriedades e parâmetros. (Fonte: Lukas, 1995)

Varaksin (1981) estabeleceu como principais critérios de limites de compactação dinâmica a baixa permeabilidade do solo, profundidade de solos de baixa permeabilidade, espessura de solos compressíveis, teor de matéria orgânica e estado inicial de solo muito mole. Salientou ainda que a compactação dinâmica se torna cada vez menos eficaz, pois a condutividade hidráulica do solo diminui para menos de 10^{-7} m/s quando a camada impermeável é muito espessa.

2.5.5 Desaceleração do martelo de compactação e força de impacto

Chow *et al.* (1990) consideravam há 30 anos que as medidas de desaceleração poderiam ser uma promessa de avaliação de melhoria de solos e que a partir delas poderiam ser desenvolvidas curvas dinâmicas de carga *vs* deslocamento através de medições com acelerômetros. Estes afirmaram que o nível máximo de desaceleração, bem como a frequência de excitação estão relacionados com a magnitude das rigidezes dos estratos, de forma que a máxima aceleração deve exceder 100 g e a frequência máxima de desaceleração pode atingir 1000 Hz.

Oshima e Takada (1994), a partir de estudos em centrifugas com materiais granulares, propuseram um modelo de cálculo usando o princípio da conservação de quantidade de movimento em queda livre (denominado Momento RAM) considerando uma colisão perfeitamente inelástica, conforme Figura 24a. A equação 20 seguir fundamenta a desaceleração do corpo após impacto, e que permite descrever os gráficos em diferentes alturas na ilustração da Figura 24b.

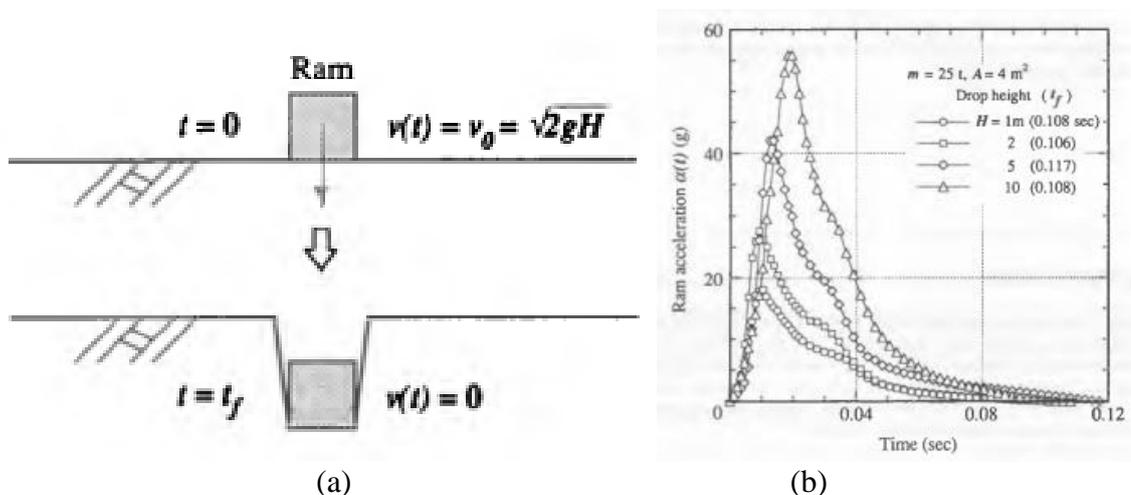


Figura 24 – Modelo de desaceleração do martelo de compactação: a) esquema teórico; b) gráficos de desaceleração do martelo. (Fonte: Oshima e Takada, 1994)

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t)dt \quad (20)$$

E a força de impacto é descrita matematicamente pela equação 21:

$$F(t) = M a(t) \quad (21)$$

2.5.6 Vibrações no solo

O impacto da queda de um peso em uma superfície do solo provoca vibrações no meio. Dependendo da magnitude destas vibrações pode haver danos às estruturas de edifícios próximos e equipamentos sensíveis, ativar liquefação dos solos, com também o conforto das pessoas nas adjacências. Tendo em vista estas questões, o monitoramento adequado da velocidade de propagação de ondas de impacto aliado as frequências das vibrações podem prevenir danos às construções adjacentes. (LAUZON *et al.*, 2011; LUKAS, 1995; e SLOCOMBE, 2013).

A energia de impacto do martelo em centros urbanos é limitada em função das ondas vibratórias que se propagam no solo e que por sua vez podem viabilizar ou não a compactação dinâmica ou substituição dinâmica nestas áreas. Vários pesquisadores definem determinadas faixas de frequência de vibrações e velocidade de pico das partículas que seriam prejudiciais para as edificações (HAMIDI *et al.*, 2011b). A maioria delas considera na avaliação de danos estruturais, além da velocidade, a frequência da vibração. (BACCI *et al.*, 2013)

Nordal (2009) e Haldar (2018) explicaram que as ondas sísmicas naturais ou artificiais propagam-se em pulsos e que podem ser divididas em ondas de corpo ou volumétricas (ondas de compressão e ondas de cisalhamento) e em ondas de superfície (*Rayleigh Waves e Love Waves*), conforme Figura 25. As ondas compressão (Ondas P) se propagam através de compressão uniaxial e deformação dilatante na direção do deslocamento das ondas (ver a Figura 25a) e as ondas de cisalhamento (Ondas S) transportam energia com velocidade mais baixas que as ondas P em um padrão muito complexo, de forma que as partículas vibram sobre sua posição média fixa em um plano perpendicular à direção da propagação das ondas (ver a Figura 25b).

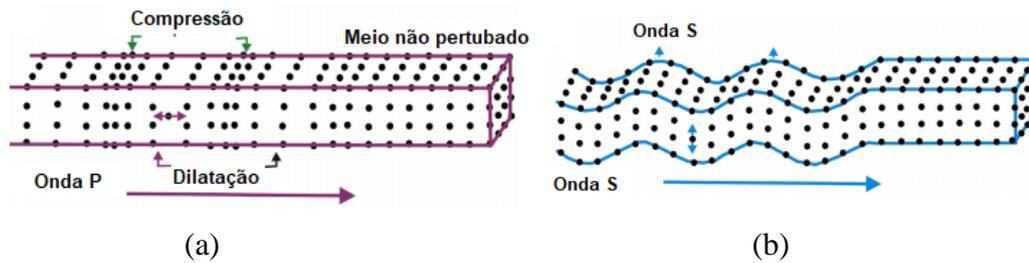


Figura 25 – Propagação de ondas sísmicas em um solo: a) Ondas P; b) Ondas S. (Fonte: Haldar, 2018)

Quanto as ondas superficiais, Haldar (2018) citou que as Ondas de Love (*Love Waves*) representam um tipo de onda de superfície com movimento horizontal cisalhante ou transversal a direção de propagação e por fim explicou que as ondas *Rayleigh* são formadas quando o movimento das partículas é oriundo da combinação de vibrações transversais e longitudinais que criam movimentos retrógrados elípticos no plano vertical ao longo da sua trajetória.

Segundo Lay (1995), as ondas *Rayleigh* são criadas interações entre as ondas primárias e secundárias (ondas P e ondas S) que se deslocam no espaço com velocidades inferiores às velocidades das ondas cisalhantes e com amplitudes que decaem exponencialmente ao longo da superfície, cuja propagação ocorre com geometria cilíndrica e que tem atenuação geométrica bidimensional com um determinado raio em relação à fonte. Woods (1968) formulou a atenuação geométrica com base no tipo de onda e distância, de forma que a amplitude das ondas corporais em campo próximo atenuava em $1/r^2$; a amplitude das ondas corporais em campo distante atenuava em $1/r$; e a onda de superfície em $1/\sqrt{r}$.

De acordo com Lopes (2003), quando em um meio verticalmente heterogêneo (i.e., formação de solos com variação estratigráfica), estas ondas apresentam um comportamento dispersivo, ou seja, diferentes frequências têm diferentes velocidades de propagação, designada por velocidade de fase. A propagação da onda é influenciada pelas propriedades mecânicas de cada camada, de solo atravessada(s) com um certo valor de λ . Vale salientar que a propagação da onda *Rayleigh* num meio heterogêneo é um fenômeno multi-modal, isto é, para a mesma frequência podem coexistir múltiplos modos de propagação, com diferentes λ e consequentemente diferentes velocidades.

Bo *et al.* (2009) comentaram que as ondas de cisalhamento e as ondas superficiais (*Rayleigh Waves*), que são mais lentas, percorrem a estrutura esquelética do solo, com isso a combinação de uma diminuição temporária de tensões de contato e a oscilação dinâmica possibilitam que as partículas do solo se reorganizem para se tornar mais compactas. Importante sinalizar que a influência destas ondas é variável segundo o tipo de solo e grau de saturação.

Em simulações, Miller e Pursey (1955) avaliaram a distribuição da energia irradiada através das ondas compressivas, de cisalhamento e de superfície, configuradas por um disco circular, análogo a um martelo de compactação de base circular, que ao entrar em contato com o solo vibra normalmente com a superfície livre de um sólido isotrópico semi-infinito, como ilustra a Figura 26. Em termos de relevância de geração de ondas, foi percebido que 6,9% representavam ondas de compressão, 25,8% em ondas cisalhantes e 67,4% em ondas superficiais *Rayleigh*.

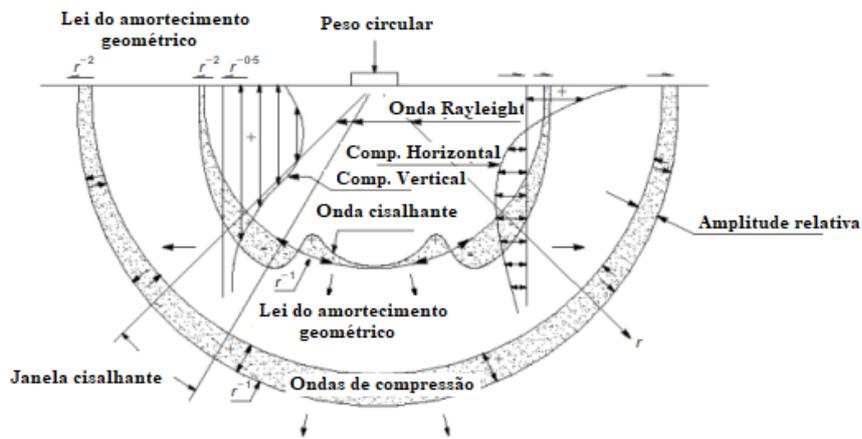


Figura 26 – Mecânica da propagação de ondas em um solo após a imposição da compactação dinâmica. (Fonte: Traduzido de Bo *et al.*, 2009)

Em termos práticos, em solos granulares saturados, os ciclos de compressão e alívio podem desencadear um processo de liquefação pois as ondas compressivas tendem a reposicionar os grãos para um arranjo menos resistente em função da presença da película de água nos contatos. No caso dos solos granulares em estado fofo, as ondas cisalhantes podem propiciar um arranjo mais denso e, portanto, mais resistente ao cisalhamento. (GAMBIN, 1997)

Siskind *et al.* (1989) e Lauzon *et al.* (2011) explicaram que a magnitude dos níveis de vibração do solo pode ser medida em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. Frequentemente, o movimento harmônico é assumido ao converter de um parâmetro para outros parâmetros. A relação entre os valores de pico de ondas harmônicas pode ser expressa pela equação (22):

$$a_w = 2\pi f V_w = (2\pi f)^2 S_w \quad (22)$$

Siskind *et al.* (1989) enfatizaram que as interações entre as vibrações e os meios de propagação dão origem a vários tipos de ondas, incluindo as ondas diretas compressivas e de

cisalhamento, ondas corporais refratadas e ondas de superfície polarizadas horizontalmente e verticalmente, porém tem seus efeitos individuais em estudos sismológicos.

Quando há consolidação dinâmica em ambientes urbanos, o nível de vibração do solo se torna uma grande preocupação. As velocidades de pico de partículas são geralmente usadas na definição de critérios de danos para edifícios e níveis de desconforto para seres humanos. (MAYNE *et al.*, 1984; HOMAN, 1985 e LAUZON *et al.*, 2011)

2.5.6.1 Comportamento das vibrações mecânicas no solo

As medidas de vibrações podem ser conseguidas monitorando a aceleração da queda de peso, pois são proporcionais às forças de reação do solo. Entretanto, essas forças de reação englobam fatores específicos como compactação do solo, substituição, liquefação, grade poropressão, falha no aterramento local, deformações plásticas e elásticas e outros, tornando assim questionável a veracidade do valor característico. (ADAM e BRANDL, 2009)

Kopf *et al.* (2010) mostraram que há uma rápida diminuição da velocidade máxima no solo com a distância em relação ao centro de impacto de um peso e afirmaram que essas correlações são relevantes se a compactação pesada for realizada perto de prédios, dutos, e demais estruturas.

Os autores afirmaram ainda que o grau de compactação pode ser medido através da aceleração da queda de peso em função da proporção das forças de reação do solo, ainda que seja dificilmente adequado a um controle e monitoramento confiável. [e.g, Giese, 2019] Como dito anteriormente, Chow *et al.* (1990) pensavam em algo assim anos antes, so que voltado para o recurso da desaceleração como parâmetro de monitoramento.

Na Figura 27a percebe-se que o nítido decaimento das vibrações do solo natural causado pelo amortecimento do impacto no meio é característico da interação solo-energia transferida no contato e assim há uma otimização específica do local, sendo a mesma representada pelo pico de aceleração. Em relação a Figura 27b, utilizar retas de declínios elásticas a partir de um sistema de grau único de liberdade visivelmente amortecido pode representar uma forma simplificada de apresentação e interpretação do amortecimento de uma onda no solo.

Kopf *et al.* (2010) anunciaram esquematicamente a resposta da vibração livre e forçada no domínio de tempo e frequência, sendo percebido que uma vez considerado um *SDOF* pode-se obter a frequência amortecida e coeficiente de amortecimento de *Lehr* a partir da medição de aceleração gerada pelo impacto do peso no solo. Além disso, os autores equacionaram as vibrações em situações distintas a partir da Figura 28.

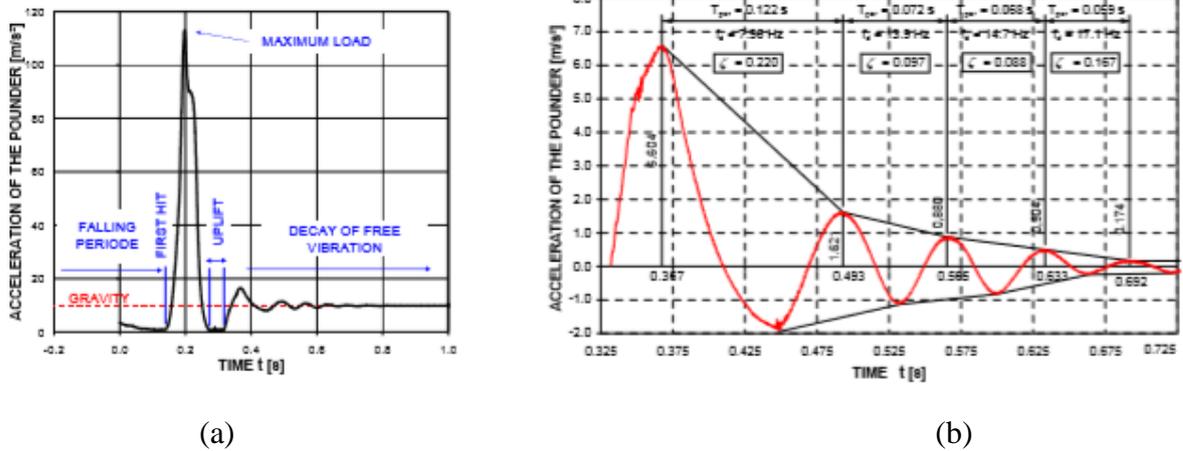


Figura 27 – Decaimento da aceleração de ondas no solo. a) aceleração do peso (diâmetro = 1,8 m, massa = 16,5 toneladas) após atingir solo *in natura* de uma altura de queda de 1 m; b) avaliação de amortecimento de vibrações do solo livre, a partir de parâmetros dinâmicos para um SDOF com viscosidade. (Fonte: Kopf *et al.*, 2010)

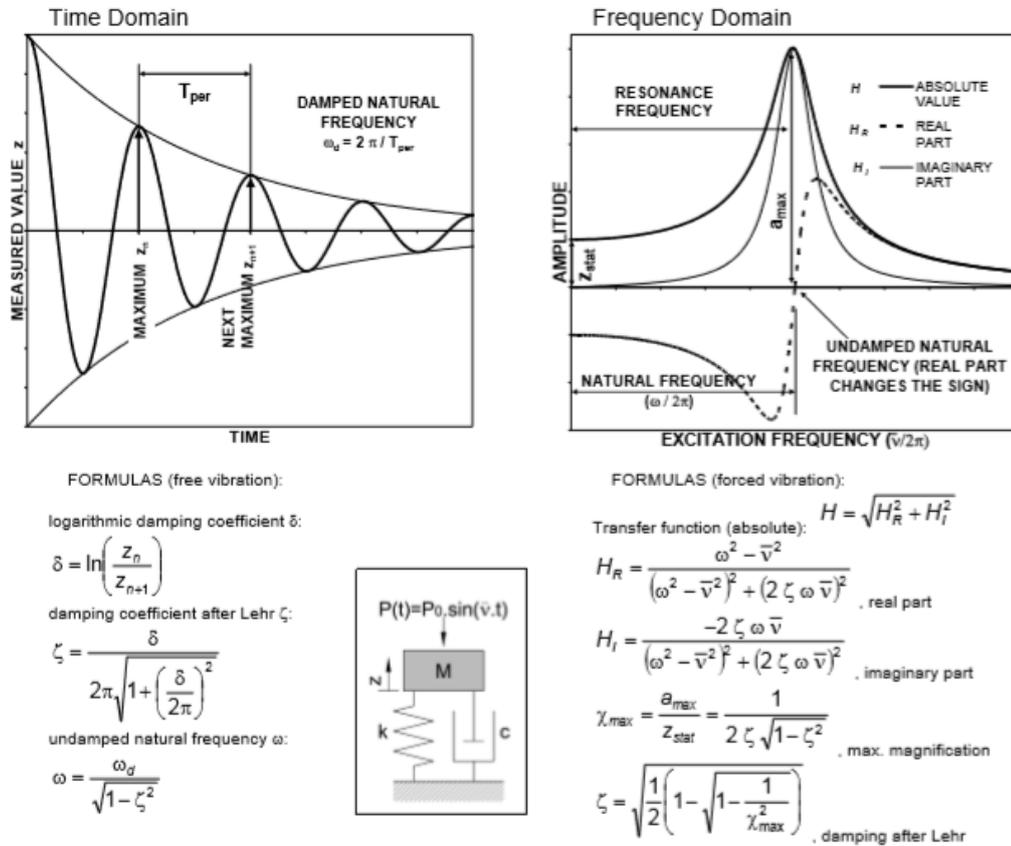


Figura 28 – Propriedades mecânicas das vibrações em um sistema de um único grau de liberdade: Esquema e equações da resposta de vibração livre e forçada no domínio do tempo e da frequência. (Fonte: Kopf *et al.*, 2010)

Hwang e Tu (2006) perceberam que os picos de vibração nas direções vertical e radial são aproximadamente os mesmos e notavelmente maior que o pico na direção tangencial, mas a grandes distâncias do ponto de impacto (≥ 100 m), os picos de vibração das três direções (vertical, radial e tangencial) se igualam em função da atenuação. Os mesmos, ao avaliarem o espectro de amplitude, com o uso da transformada de Fourier e perceberam que são as semelhantes na mesma direção. O espectro de amplitude em curtas distâncias tem um predomínio mais visível para determinadas bandas de frequência e um pico correspondente a esta distância. Isto ocorre em função da presença de energias concentradas em distâncias curtas e múltiplas refrações e reflexões das ondas de tensão entre as camadas do solo.

Kopf *et al.* (2010) estudaram a propagação de ondas nos solos a partir simulações numéricas com base no MEC, cujo processo de compactação pesada considera o solo carregado abaixo do nível original com números crescentes de impactos. Desta forma, o martelo de compactação penetra cada vez mais fundo no solo, conseqüentemente, altera as condições dinâmicas do sistema, dependendo dos parâmetros do martelo (massa e geometria) e dos solos (densidade, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade).

Lupiezowiec e Kanty (2015) estudaram o comportamento de vibrações geradas pela construção de colunas de rocha por substituição dinâmica em uma obra rodoviária e simularam numericamente com acoplamento de modelo de propagação de vibrações. As observações das medições na coluna mostraram que após a queda do peso houve um pico de aceleração, independente da distância de leitura, com atenuação de sua amplitude através de 3 ciclos sinusoidais, seguidos por uma descarga total da onda induzida. Além disso, se conseguiu obter uma boa correlação através da simulação numérica e os dados através da equação do movimento e integração constitutiva usando algoritmo de *Hilbert-Hughes-Taylor*.

2.5.6.2 Velocidade de pico das partículas – Formulações, normatizações e recomendações

A velocidade de propagação das partículas é o parâmetro mais prático para regular o potencial de dano para uma classe de estruturas com características de resposta bem definidas (por exemplo, casas e edificações em geral). (SISKIND *et al.*, 1989). Hwang e Tu (2006) explicaram que a vibração do solo induzida pela compactação dinâmica aproxima uma onda de impulso de um ciclo, cujas durações de vibração estão entre 0,1 a 0,3 s, de forma que a duração da vibração vertical é a mais curta, a direção radial é a mais longa e na direção tangencial é intermediária. Conceitualmente, Lauzon *et al.* (2011) explicou que a *PPV* representa a soma

vetorial da velocidade máxima nas três direções (x, y e z) durante a ocorrência de evento sísmico medido na superfície do terreno. A NBR 9653 (2005) demonstra como calcular a *PPV* com base na equação descrita pela equação (23):

$$PPV = \sqrt{V_{x,máx}^2 + V_{y,máx}^2 + V_{z,máx}^2} \quad (23)$$

Hamidi *et al.* (2011b) citaram que antes de realizar a compactação dinâmica, as *PPVs* devem ser previstas para determinar a probabilidade de exceder os limites de especificação e a aplicação de contingência para reduzi-las.

Até então, o primeiro método de previsão de vibração geotécnico relatado na literatura foi desenvolvido por Attewell e Farmer (1973). Neste estudo, de caráter empírico, foram analisados diversos resultados de vibração medidos na cravação de estacas por método vibratório e impacto e ajustados por intermédio de regressão linear. Foi verificado que os valores de *PPV* estabeleciam relação de dependência com a distância da fonte de vibração, a energia do equipamento de cravação durante a cravação da estaca e com um coeficiente *K*, conforme a equação (24):

$$PPV = K \left(\frac{E^{0,5}}{D_W} \right) \quad (24)$$

Onde *K* apresenta valores de Vibração = 0,7 e de Impacto = entre 1,0 e 0,5.

Wiss (1981) compôs a formulação (ver a equação 25) que seria o molde para as equações empíricas usadas na predição de *PPV* por variados pesquisadores, como por exemplo Mayne *et al.* (1984), Mayne (1985), Drowing (2000) e Rollins e Kim (2010), conforme Tabela 4.

$$PPV = K \left(\frac{D_W}{\sqrt{E}} \right)^{-n} \quad (25)$$

Nesta equação, assim como Attewell e Farmer (1973), apresenta valores de *K* =0,7 para Vibração e entre 1,0 e 0,5 para casos de impacto. No caso de *n*, ele estabeleceu valores entre 1 e 2.

Tabela 4 – Equações empíricas usadas para previsão de *PPV*. (Fonte: Própria, 2020)

Autores	Equações
Mayne <i>et al.</i> (1984)	$PPV = 7 \left(\frac{\sqrt{WH}}{D_W} \right)^{1,4}$
Mayne (1985)	$PPV = 92 \left(\frac{\sqrt{WH}}{D_W} \right)^{1,7}$ $PPV = 0,2 \left(\frac{D_W}{r_o} \right)^{1,7} \sqrt{2gh}$
Dowding (2000)	$PPV = 67 \left(\frac{\sqrt{WH}}{D_W} \right)^{1,1}$
Rollins and Kim (2010)	$PPV = 20 \left(\frac{\sqrt{WH}}{D_W} \right)^1$
Hamidi (2014)	$PPV = 560 D_W^{-1,1}$

Existem muitas pesquisas e regulamentações relacionadas às vibrações em solos por ocorrência de explosões em zonas urbanas e pelo mundo que podem ser úteis quando análogas às vibrações em solos causados por compactação dinâmica.

Bacci *et al.* (2013) realizaram uma coletânea de normas europeias mais importantes, sendo elas: norma alemã (DIN 4150), norma italiana (UNI 9916), norma suíça (SN 640312 a), norma portuguesa (NP – 2074), norma sueca (SS4604866), normas inglesas BS 5228 (1997) para controle de ruído e vibração em construções e áreas a céu aberto; BS 6472 (1992) para avaliação da exposição humana à vibração em edifícios; e BS 7385 (1990) - avaliação e medições de vibração em edifícios), por fim as recomendações francesas (AFTES e a Circular do ministério do ambiente). Estes ainda enfatizaram que parte foram elaboradas com base em dados experimentais, analisando parâmetros como o tipo de construção e o material nela utilizado, e outras se basearam apenas em valores empíricos, mas todas apresentam valores conservativos.

No Brasil, a norma referência para vibrações é a NBR 9653 (2005) e discrimina os efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações e em áreas urbanas, como pode ser visto na Figura 29. A pressão acústica, medida além da área de operação, não deve ultrapassar o valor de 100Pa, o que corresponde a um nível de pressão acústica de 134 dBL pico. Essa mesma norma apresenta gráfico limite que guarda uma certa similitude com o trabalho de Lukas (1995) apresentado na Figura 30.

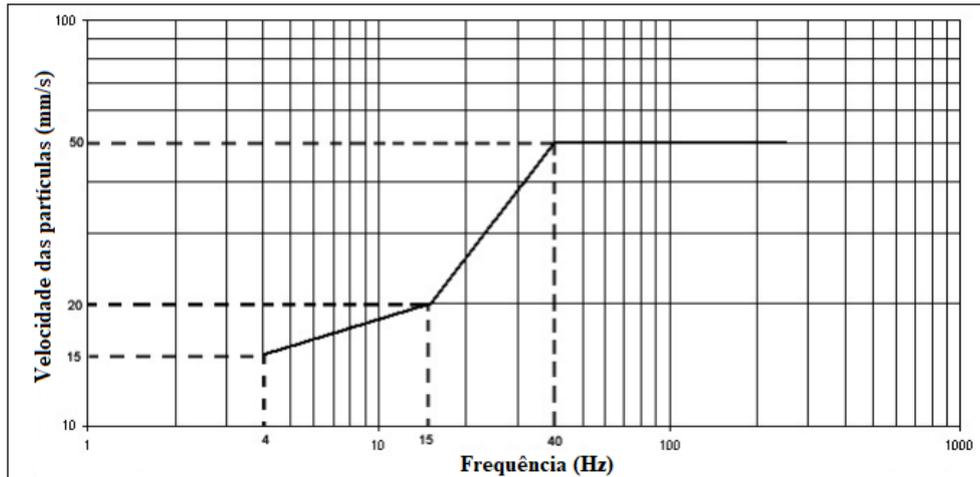


Figura 29 – Limites de PPV por faixas de frequência em minerações e áreas urbanas no Brasil. (Fonte: NBR 9653,2005)

Siskind *et al.* (1989) estudou danos em edificações a partir da influência de níveis de vibração e velocidade de partículas em função do deslocamento sofrido através de explosões. Lukas (1995) citou que várias medições de projetos de compactação dinâmica indicaram que a frequência de vibrações do solo a partir da compactação dinâmica está na faixa de 6 a 10 Hz. Nessa frequência, os critérios do *U. S Bureau of Mines* dos EUA indicaram que as velocidades das partículas devem ser menores que 13 ou 19 mm/s para construções mais antigas e modernas. A Figura 30 ilustra a relação entre a velocidade de propagação de ondas e as frequências divulgadas por Lukas (1995) com base no USBM RI 8507.

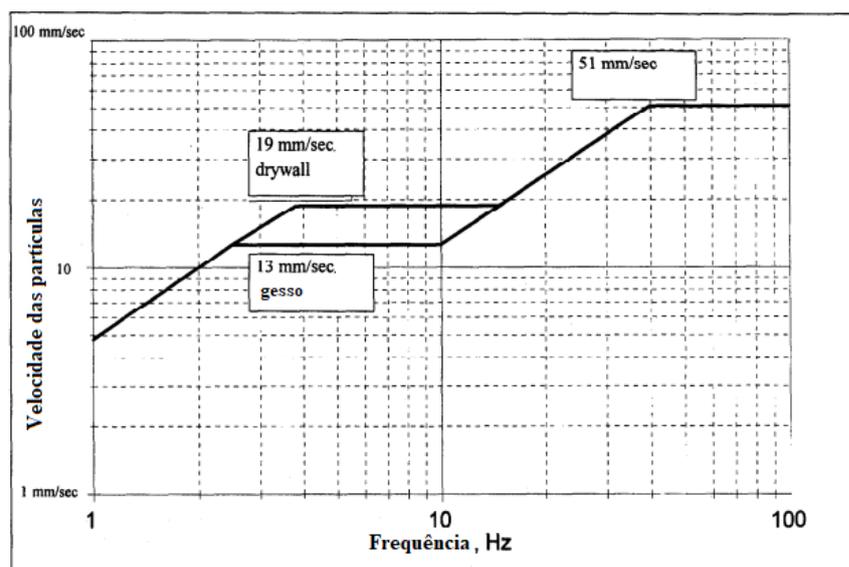


Figura 30 – Níveis seguros de vibração oriunda da detonação em edificações a partir da combinação de velocidade de partícula e deslocamentos gerados. (Fonte: Lukas, 1995)

Segundo Bacci *et al.* (2003), a norma brasileira não avalia o parâmetro frequência e não classifica os diferentes tipos de estruturas civis, restringindo-se ao valor resultante da velocidade de vibração como parâmetro medido, sendo limitada e deficiente comparada às normas internacionais.

Siskind *et al.* (1989) consideraram complexo avaliar o potencial de dano das vibrações de explosão, usando uma combinação de velocidade de partículas e deslocamento. Isso permite níveis mais altos para os casos de frequência intermediária (15 a 40 Hz), mas requer velocidades de partícula menores para as frequências mais baixas (< 4 Hz), uma vez que a complexidade da medição tornará isso impraticável para muitas situações. Slocombe (2013) sugeriu três valores limite de velocidade de pico das partículas direcionado à fundação de edificações em bom estado de conservação, conforme Tabela 5.

Em termos de tipos de obras, os limites específicos de segurança por vibração foram descritos em Lauzon *et al.* (2011), o qual sumarizaram os estudos de Wiss (1968), Crawford e Ward¹⁷ (1965) e Siskind¹⁸ (2000), conforme Tabela 6.

Tabela 5 – Limites de velocidade de pico de partículas em relação ao tipo de dano. (Fonte: Slocombe, 2013)

Tipos de danos	PPV (mm/s)
Danos estruturais	40
Danos arquitetônicos	15
Desconforto humano	2,5

Mayne *et al.* (1984) explicaram que a atenuação do PPV é relativa ao local e está relacionada com a distância escalonada ($d / (WH)^{0.5}$). A Figura 31 ilustra a variação do comportamento dos solos decorrente da distância escalonada e do tipo de solo referente a geografia do local.

Slocombe (2013) citou que há uma tendência comportamental da velocidade de pico de partículas em função da distância de transmissão de vibrações. Concluindo que os limites superiores de compactação dinâmica tendem a ocorrer na presença de solos granulares ou em

¹⁷ Crawford, R. e Ward, H.S. (1965) “Dynamic Strains in Concrete and Masonry Walls.” Building Research Note, nº 54, *Div Building Research. National Research Council*, Ottawa, ON Canada. 13 p.

¹⁸ Siskind, D.E. (2000) “*Vibrations from Blasting*.” Cleveland: ISEE.

algum tipo rejeito e o limite inferior em estratos com presença de materiais coesivos, sendo que o lençol freático elevado tenderá também ao limite superior.

Tabela 6 – Critérios de velocidade de pico de partículas por tipos de estruturas. (Fonte: Lauzon *et al.*, 2011)

Tipos de estruturas	Critérios de <i>PPV</i> (mm/s)
Estruturas comerciais e de engenharia	102
Utilitário enterrados, poços e tubulações	127
Fundação de alvenaria	127
Paredes de blocos de concreto	76
Concreto massa	254
Obras subterrâneas	305

Michelin *et al.* (2015) em projetos de melhoramento desenvolvidos em solos vulcânicos e siltosos na Turquia, que uma distância de 20m do ponto de impacto seria considerada satisfatória tendo em vista os valores de *PPV* inferiores à 15mm/s.

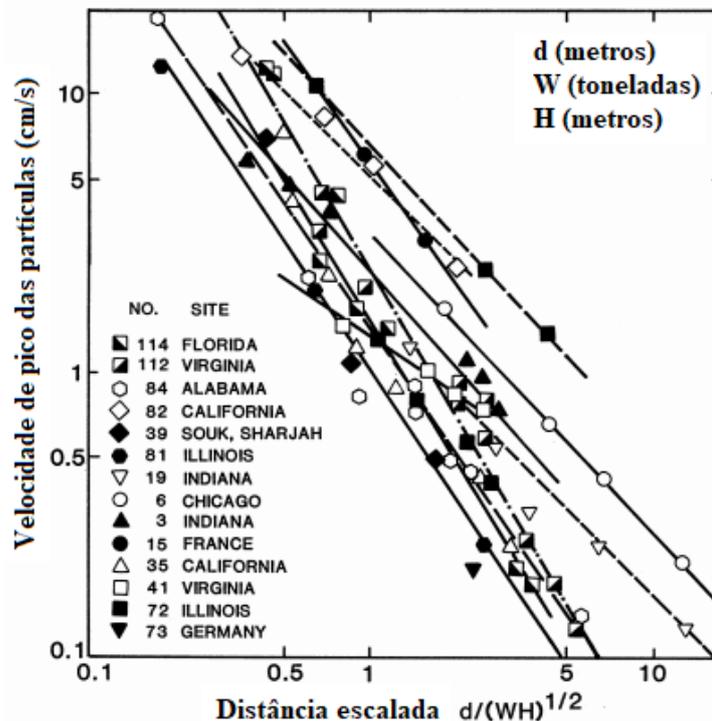


Figura 31 – Atenuação de vibrações no solo medidas em diferentes projetos de compactação dinâmica. (Fonte: Mayne *et al.*, 1984)

2.5.7 Frequência das partículas – recomendações e limitações

Assim como o *PPV*, a frequência das ondas, oriundas da compactação dinâmica, pode ser analisada por vibrações causadas por explosões em áreas urbanas. A frequência de vibração é um parâmetro bastante significativo para o comportamento da vibração pode ser obtida através da aplicação do Teorema de Fourier às relações velocidade de propagação *vs* tempo, de forma que como a velocidade se propaga tridimensionalmente, são medidas três frequências (radiais, tangenciais e verticais). [e.g., Hwang and Tu, 2005; Lav *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2019] Hwang e Tu (2005) demonstraram que a magnitude da frequência de vibração é relativa de direção da velocidade de propagação da onda, sendo demonstrado que as frequências primárias verticais foram superiores às frequências primárias radiais. Contudo, Lav *et al.* (2010) perceberam que as frequências radiais eram semelhantes às verticais diferindo das conclusões de Hwang e Tu (2005). Em fundações rochas, Wu *et al.* (2019) perceberam que a duração da vibração radial é maior, além disso as formas das ondas radial e vertical foram aproximadamente semelhantes em tempos diferentes de compactação em cada direção. Neste estudo, o domínio da frequência da vibração radial variou entre 3 a 42 Hz, contendo duas frequências primárias de 6 a 10 Hz e 13 a 22 Hz. O domínio da frequência da vibração vertical variou de 5 a 50 Hz, contendo também duas frequências primárias de 6 a 8 Hz e 16 a 18 Hz.

A literatura dispõe de muitos valores de faixa de frequência obviamente em função das diferentes energias de impacto, solos etc. Inicialmente, Menard e Broise (1975) afirmaram que as vibrações se encontram na faixa de 2 e 12 Hz e parecem ser transmitidas pelo substrato, cujo valor mais frequente é da ordem de 3 a 4 Hz. Existem outros trabalhos que citam outras faixas de frequência como 3,7 Hz a 5,35 Hz (Lav *et al.*, 2010), 2 a 20 Hz (Mayne, 1985; Mitchell, 1981), 6 a 10 Hz (Lukas, 1995), 5 a 20 Hz (Hamidi, 2014), 5 e 10 Hz para compactadores convencionais e de 20 e 30 Hz para equipamento *RIC* (Lauzon *et al.*, 2011).

Dumas ¹⁹(1982 *apud* HOMAN, 1985) estudando 5.000 situações percebeu que as frequências das vibrações variam entre 2 e 12 Hz, sendo que os valores mais usuais se situam entre 5 e 8 Hz, de forma que as ondas são fracamente amortecidas e compreendem entre 3 a 6 ondas com amplitude constante. Ressalva-se que valores mais baixos devem ser adotados para edifícios em más condições ou situações ambientalmente sensíveis, como escolas, hospitais e instalações de computadores. Determinadas empresas de computadores reconhecem a importância da frequência de vibração exigindo limites mais onerosos para frequências (abaixo

¹⁹Dumas, J. C. (1982) "Dynamic Consolidation: Its Development in Canada," a paper presented at the *Conference on Construction in Difficult Soils*, Canadian Society for Civil Engineering, Thunder Bay, Ontario.

de 14 Hz do que as anteriores). Deve-se notar que alguma amplificação pode ocorrer quando a vibração migra verticalmente em certos tipos de estruturas (Ex: *PPV* igual a 1,0 mm/s no nível do solo pode atingir valores de 2,5 mm/s no terceiro piso). Os serviços e utilidades devem ser considerados individualmente, dependendo de sua idade, condição e importância, com uma faixa de valores considerados aceitáveis de 15 a 20 mm/s, exceto para redes de gás de pressão mais alta. (SLOCOMBE, 2013). Neste trabalho foram estabelecidos limites para as frequências de vibrações entre 30 Hz e 50 Hz. Salientando a necessidade uma avaliação cuidadosa quando o solo a ser tratado seja uma areia, cascalho ou rochas relativamente densas, uma vez que podem desencadear liquefação ou rupturas abruptas, em casos de rochas.

Pal Roy (2005) comentou que a frequência de vibração pode ser calculada de várias maneiras, incluindo técnicas de espectro de Fourier e de resposta, bem como a inversão das faixas de tempo lidas entre cruzamentos de zero nos registros de rastreamento, como um módulo avançado. Alguns pesquisadores incluíram frequência ao longo da velocidade de pico da partícula para os critérios de dano. Just e Chitombo²⁰(1987 *apud* PAL ROY, 2005) fizeram referência aos estudos feitos em edificações australianas relacionando-os com deslocamentos e valores frequências e *PPV*, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Critério limite de frequências de vibrações da Austrália segundo a CA- 23 1967. (Fonte: Just e Chitombo, 1987)

Tipos de estruturas	Valores máximos
Prédios históricos, monumentos e edificações com valor especial.	Deslocamento de 0,2 mm para frequências menores que 15 Hz.
Casas e edifícios residenciais baixos e edifícios comerciais não incluídos abaixo.	19 mm/s resultante de um <i>PPV</i> de frequências maiores que 15 Hz.
Edifícios comerciais e edifícios industriais de (concreto armado ou aço).	Deslocamento máximo de 0,2mm correspondendo a um <i>PPV</i> de 12,5mm/s com 10 Hz e 6,25mm/s com 5 Hz.

Nichollas *et al.* (1971) publicaram que em 6 dos 14 edifícios testados a partir de 160 testes mecânicos vibratórios feitos sobre o ponto de dano em falhas do gesso e concluíram que as amplitudes variaram de 0,0254 mm a 12,5 mm com frequências entre 4 a 40 Hz. Para relacionar

²⁰Just, G. D. e Chitombo, G. P. (1987) “*The economic and operational implications of blast vibration limit mining and environment*”. Austrália: The Aus IMM, pp. 117-124 p.

as amplitudes e frequências vibratórias aos danos, três classificações de dano foram propostas com base no grau de falha do gesso. Esses índices de dano foram:

- a) danos maiores (queda de gesso, sérias rachaduras);
- b) pequenos danos (fissuras de gesso finas, abertura de rachaduras antigas);
- c) nenhum dano.

Em relação às demais normas e recomendações quanto às frequências de vibrações de outros podem ser vistos nos trabalhos do Nieble (2017) e Pal Roy (2015).

2.6 COMPACTAÇÃO DINÂMICA/SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA– EQUIPAMENTOS, ESPECIFICAÇÕES E PROCEDIMENTOS

Em sua pesquisa, Hamidi (2014) descreveu a trajetória de toda a construção dos primeiros equipamentos de compactação dinâmica, sendo contextualizada as dificuldades práticas de realizar a técnica através da queda livre seja no desgaste de peças, desvio da lança do peso e ineficiência da mão de obras. Inicialmente, foram desenvolvidos os primeiros equipamentos com uso de cabos de baixa capacidade (limitados a 150 kN) atingindo assim profundidades de tratamento em torno de 8 a 10 m. Atualmente, o uso da técnica encontra-se bastante consagrado e num patamar tecnológico inclusive mais avançado, no que tange a potência dos equipamentos (capacidade de içamento), formas de aberturas (tipos de gatilhos), locação de pontos por georreferenciamento, monitoramento de cargas dinâmicas (com uso de sismógrafos) deslocamento (com inclinômetro), ensaios *in loco* (PMT, DMT, CPTu e SPT) e modelagem numérica (Métodos dos elementos finitos, método dos elementos discretos e outros) .

No caso da substituição dinâmica, há uma tendência de os martelos serem mais pesados e liberados com alturas maiores comparados aos da compactação dinâmica (ver a item 2.6.5), uma vez que se necessita de um nível de energia maior para introdução do material no solo. Entretanto, como os equipamentos da substituição dinâmica são similares aos da compactação dinâmica, a seguir serão apresentados os equipamentos comumente utilizados no método DR.

2.6.1 Equipamentos estáticos em estruturas treliçadas *onshore*

Hamidi (2014) informou que o tripé de *Menárd* ou *Tripod* (ver a Figura 32) é uma estrutura extremamente leve que é capaz de fornecer 1.600 t.m de energia por impacto, lançando um peso

de 40 toneladas a uma altura de 40 m. Este equipamento foi utilizado para melhoramento de solos das obras do Aeroporto de Changi (Singapura), no Aeroporto de *Kansai* (Japão) e no Terminal de Óleo de *Tsing Yi* (Hong Kong).



Figura 32 – Tripé de Menard usado na compactação dinâmica. (Fonte: Hamidi, 2014)

Essa sonda também poder ser remontada e foi usada com sucesso em vários países, incluindo Estados Unidos, Japão, República Dominicana, Bangladesh e México. O'Brien e Guptan (1984) mencionaram uma planta de fertilizante em *Ashuganj*, Bangladesh, que foi compactada a profundidades de até 20 metros através de um peso de 40 toneladas a uma altura de 25 metros em queda livre por intermédio de um tripé especialmente projetado.

2.6.2 Equipamentos em plataformas móveis com lanças treliçadas *onshore*

Hamidi *et al.* (2011a) afirmaram que para superar as limitações de levantamento do guindaste, Menard desenvolveu e fabricou suas próprias plataformas. O equipamento de 7 MN.m, mostrado na Figura 33, foi capaz de levantar pesos de 250 kN. A capacidade de montar e desmontar esta plataforma facilitou seu transporte e fez uma escolha atraente para projetos no exterior.

A mega-máquina foi capaz de fornecer uma energia de 16 MN.m por impacto. Esta máquina, mostrada na Figura 33, foi usada para as obras de melhoramento do solo de Berna a Biel, Estrada na Suíça (HAMIDI, 2014). Hamidi *et al.*(2011a) comentaram que com a introdução de uma nova geração de guindastes de alta produção tornou-se capaz de levantar um

martelo de compactação usando duas linhas de cabos individuais conectadas a dois tambores de guincho e assim aumentaram a capacidade de elevação de 150 kN para 250 kN, sendo estes novos equipamentos de guindastes sobre esteiras (“*Crawler crane*”). Embora, Slocombe (2004) tenha informado que os guindastes de esteira padrão americanos tivessem capacidade de içamento de 33 toneladas e elevasse a alturas de 30m.



Figura 33 – a) Equipamento de compactação dinâmica com energia de 7 MNm; b) Mega máquina compactação dinâmica com energia de 16 MNm. (Fonte: Hamidi, 2014)

Lauzon *et al.* (2011) ilustraram e expuseram alguns modelos de equipamentos sobre esteiras em seus trabalhos e comentaram casos de usos, sendo eles: uma esteira rolante especialmente modificada com guindaste levantando um martelo de compactação para densificar a fundação de um dique no local da barragem hidroelétrica de *Peribonka*, no norte do *Quebec*, cujos exemplos são ilustrados na Figura 34.

Hamidi *et al.* (2011a) comentaram que no projeto *Al Quoa'a*, a utilização de guindastes pesados e a implementação de pesos de 150 kN poderiam ter fornecido energia de impacto suficiente para tratar apenas metade do projeto, no entanto, essa quantidade de energia não teria sido capaz de tratar as áreas mais profundas remanescentes, criando assim uma necessidade de equipamentos mais especializados. Assim, a plataforma de 7 MN.m e as guias de serviço pesado equipadas com guias duplas foram mobilizadas para soltar pesos de compactação de 250 kN.

Hamidi (2014) mencionou casos de utilização deste equipamento, sendo eles: melhoramento de 200.000 m² de área para construção do *Abu Dhabi Skyline*; projeto de construção de moradias no deserto de *Al Quoa'a* nos Emirados Árabes e o projeto de

desenvolvimento comunitário *Al Falah* de 12,7 milhões de m² em 2008, nos arredores da capital dos Emirados Árabes.



(a)

(b)

Figura 34 – Guindastes sobre esteiras usados na compactação dinâmica: a) Guindaste com esteiras com peso de 15 toneladas; b) Guindaste com esteiras com martelo compactador de 10 toneladas. (Fonte: Lauzon *et al.*, 2011)

Existe uma proposta melhoramento de taludes arenosos por meio da compactação dinâmica lateral com uso deste destes equipamentos através de estruturas em treliça que rotacionam o martelo de compactação e impactam a face do talude (Abdizadeh *et al.*, 2020).

2.6.3 Equipamentos dinâmicos *onshore* – *Rapid Impact Compaction (RIC)*

Do ponto de vista histórico, o *RIC* derivou do compactador de pista rápida que foi originalmente desenvolvido no início dos anos 90 pela *BSP International Foundations Limited* em conjunto com o ministério da defesa britânico como um meio de reparar rapidamente as crateras de bombas nas pistas de aterrissagem. Com isso, uma pesquisa subsequente do *Building Research Establishment* levou ao desenvolvimento de equipamento de uso civil montada através de uma escavadeira ou guindaste sobre esteiras, uma versão modificada do Martelo Hidráulico BSP 35 (ADAM E BRANDL, 2009)

Lauzon *et al.* (2011) afirmaram que o equipamento possui um martelo hidráulico especialmente adaptado, que age sobre uma base ou um pé articulado especial, como pode ser visto na Figura 35.

O martelo é geralmente equipado com um peso de aço de 7 a 9 toneladas, a uma altura máxima de 1,2 metros. A tampa de condução ligada à base permite a articulação. A base de impacto de aço tem um diâmetro de 1,5 metros. Hamidi (2014) restringiu o peso a faixas de 5 a 9 toneladas, mas cita valores iguais da altura e do diâmetro do peso e complementa afirmando que a taxa de golpeamento é de 40 a 60 golpes/min. Mohammed *et al.* (2010) comentaram que em seus estudos este equipamento foi adotado para tratar os solos granulares fofos no local, com pesos de 7 toneladas, 35 golpes / min e altura de queda de 0,8 m. Serridge e Synac (2006) citaram valores equivalentes a respeito da altura, martelo de compactação e diâmetro.



Figura 35 – Equipamento sobre esteiras de compactação – RIC. (Fonte: Lauzon *et al.*, 2011)

Lauzon *et al.* (2011) explicaram que a energia por golpe do RIC é da ordem de 25 a 40 vezes menor do que a típica energia por golpe usada na compactação dinâmica. Logo, para se obter melhoria significativa, o dispositivo deve aplicar um maior número de golpes obedecendo a uma determinada frequência.

Ao iniciar o melhoramento é necessário estabelecer uma entrada de energia limitante. Posteriormente, formam-se algumas pequenas crateras de teste até que a penetração pneumática atinja uma faixa de 10 golpes de 25 mm (conjunto final). Os compactadores são fornecidos com um sistema de monitoramento. O monitor de compactação é um *kit* de peças que podem ser acopladas ao dispositivo de compactação para registrar o desempenho do martelo e a taxa de melhoria do solo. Os seguintes parâmetros são gravados automaticamente durante o processo de compactação e monitorados a partir da cabina do RIC por um sistema de aquisição de dados

a bordo: (a) golpes por *footprint*; (b) profundidade de penetração; e (c) entrada de energia. (ADAM e BRANDL, 2009)

Mohammed *et al.* (2010) citaram que a *RIC* se mostrou ambientalmente correta e tem efeito muito limitado sobre estruturas adjacentes, o que permite o uso desta técnica de melhoria em áreas urbanas. Como o equipamento *RIC* é baseado em menor energia de impacto, porém maior número de golpes, este método tem sido empregado a cerca de 10 a 15 m de uma estrutura existente. (SLOCOMBE, 2013). Além disso, em solos granulares fofos, as vibrações causadas pela máquina *RIC* foram medidas em termos de pico de *PPV* e encontradas a 2,43 mm/s a 5 m da via férrea, que é menor do que as medidas para travessias de trem e também dentro do limite seguro e permissível de vibração indicado nos padrões. (MOHAMMED *et al.*, 2010)

Em termos de aplicação da técnica, O principal uso do *RIC* no Reino Unido é para compactação superficial de bases de piso e sub-bases de estradas (*Terra Systems*). (HAMIDI, 2014). Serridge e Synac (2006) comentaram sobre a aplicação do *RIC* no tratamento de solos colapsáveis na remota região de *Karachaganak*, no Cazaquistão, na Ásia Central. Kristiansen e Davies (2004) realizaram um estudo sobre densificação de solos suscetíveis à liquefação na província da Columbia Britânica, Canadá com este equipamento.

2.6.4 Equipamentos de compactação dinâmica *offshore*

Conforme dito no item 2, O primeiro projeto de compactação dinâmica *offshore* foi realizado Menard em 1973 como parte da construção da doca seca da *Brest Naval Port*. Neste projeto foi utilizado um compactador de 11 toneladas especialmente projetado para compactar 3 m de depósito aluvionar no fundo do mar em uma área de 4500m². (HAMIDI, 2014).

Hamidi (2014) elencou uma série de obras realizadas com a técnica da compactação dinâmica *offshore* e complementou afirmando que convencionalmente, em tais projetos, a solução teria sido remover a argila mole, substituí-la por areia, direcionar na parede da estaca-prancha e aprofundar o cais por dragagem na frente da parede do cais. No entanto, como a areia não estava disponível na quantidade necessária e o proprietário do projeto pretendia construir uma parede de cais de gravidade, a técnica de construção da fundação consistia em remover a argila mole e substituí-la por uma camada de rocha e melhorar as areias argilosas e siltosas para fornecer uma capacidade de carga permitida de 300 kPa. A compactação dinâmica foi realizada usando um martelo de 17 toneladas com um espaçamento quadrado de 2 m de lado. O processo foi realizado em 3 a 5 fases com 2 a 10 golpes por *print*.

Chou *et al.* (2009) afirmaram que deve ser considerado que abaixo da água subterrânea, as densidades ou densidades relativas são extremamente difíceis de medir e o processo para correlacionar testes *in-situ* com densidades relativas é extremamente dependente das variações de natureza do solo, tipo de teste e a influência de sobrecarregar à pressão. Um esforço deve ser feito para especificar diretamente os desempenhos, como capacidade de carga, estabilidade, liquefação ou fator de segurança contra a liquefação.

A técnica da compactação dinâmica *offshore* por navios (Figura 36a) também foi realizada pela empresa *Menard Group*® em projeto portuário no Kuwait. Neste projeto foi usado um martelo de 32 toneladas para compactar uma camada de pedra com espessura de 2 m em 10 m de profundidade, conforme Figura 36b.

Antes da colocação das seções pré-fabricadas de uma doca seca em Lagos, Nigéria, a compactação dinâmica foi aplicada em uma área de 13.800 m² em 1979. Inicialmente, o fundo do mar foi escavado a -15 m RL (nível reduzido) e aterrado com 1 m de aterro de rochas. O melhoramento do solo foi realizado com um tirante de 400 kN com a intenção de tratar 15 m de solo com até 5 passadas de compactação dinâmica. (HAMIDI, 2014)

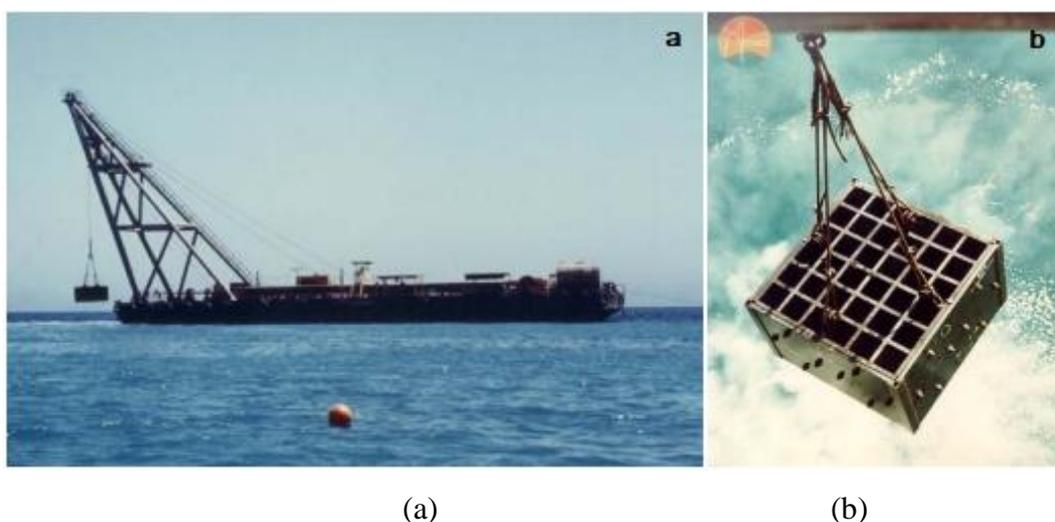


Figura 36 – Equipamento de compactação dinâmica *offshore* em barcos de grandes dimensões: a) Embarcação de compactação; b) Martelo de compactação. (Fonte: Hamidi, 2014)

Hamidi (2014) abordou também o uso de plataformas marítimas para compactação dinâmicas com martelos de dimensões de 2,3 m x 2,3 m. A Figura 37 exemplifica a compactação dinâmica realizada por uma barçaça de dimensões 15 x 50 m no projeto de terminal 3 e 4 de containers da *Pasir Panjang* (do Sudeste asiático) entre os anos 2007 e 2013.

A natural presença do empuxo da água representa um meio resistente à penetração do peso. Sabendo disso, as alturas de queda durante o teste foram ajustadas para 5 m acima do nível do leito marinho. Registros da velocidade do guincho da grua durante as obras indicam que as velocidades máximas de queda foram da ordem de 430 m/min.



Figura 37 – Equipamento de compactação dinâmica *offshore* em plataformas marítimas. (Fonte: Hamidi, 2014)

Esta velocidade é equivalente a uma queda livre do martelo de compactação a uma altura de queda de 2,6 m (no ar), e verifica a suposição original de que uma grande parte da energia cinemática dos golpes teria sido minimizada pela presença da resistência da água. A resistência da água reduz a eficiência do impacto e consequentemente as equações desenvolvidas para estimar a profundidade da melhoria do solo em compactações dinâmicas *onshore* não se aplicam a compactação dinâmica *offshore*. (HAMIDI, 2014)

2.6.5 Martelo de compactação – formatos e especificações

Os pesos de compactação também denominados de martelos de compactação (no inglês traduzido como *Tamper* ou *Pounder*) ou cilindros compactadores (FERNANDES, 2011) consistem em uma estrutura densa de golpeamento que através do contato por impacto no solo possibilita modificações nos parâmetros e propriedades mecânicas, deformáveis e hidráulicas em função da redução dos índices de vazios, expulsão de fluidos dos poros e outros fenômenos. Bo *et al.* (2009) afirmaram que os pesos de compactação apresentam variados formatos

(quadrados, hexagonais e circulares), inclusive alguns possuem parafusos prisioneiros ou porcas e parafusos usados para conectar placas de aço e criar uma estrutura robusta.

Homan (1985) citou que os pesos podem ser blocos de concreto, chapas de aço ou conchas de aço espessas cheias de concreto ou areia. Os denominados *pounders* normalmente pesam entre 5 e 20 toneladas e podem cair de alturas de até 40 metros. E salientou também que podem ser quadrados ou circulares no plano, com dimensões que variam de acordo com o peso necessário, o material usado e a capacidade de carga dinâmica da superfície do solo a ser tratada.

Em termos de tensão de contato do martelo, Lukas²¹ (1986 *apud* LUKAS, 1995) citou que pode variar entre 40 e 75 kPa, sendo que as tensões mais baixas poderiam limitar o melhoramento a uma crosta superior enquanto as tensões mais elevadas causariam ruptura por puncionamento diminuindo a eficiência da transmissão de energia. Contudo, Hamidi (2014) citou que atualmente as tensões de contato são superiores, podendo chegar a 90 kPa. NO que tange aos tipos de pesos de compactação, Kopft *et al.* (2010) apresentaram alguns modelos comuns ilustrados na Figura 38.

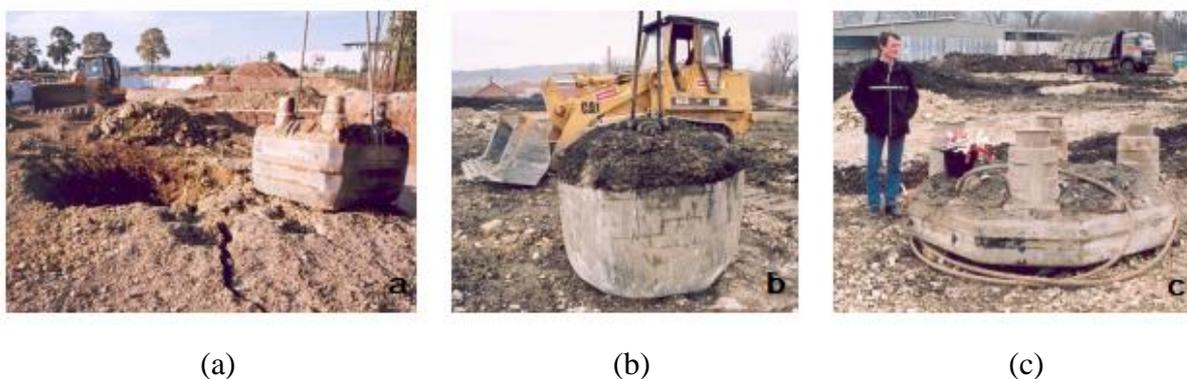


Figura 38 – Tipos de martelos usados na compactação dinâmica: a) Pilão de aço; b) Pilão de concreto; c) Pilão de aço plano. (Fonte: Kopft *et al.*, 2010)

Oshima e Takada (1997) simularam a compactação dinâmica em modelos físicos centrifugados com areias e demonstraram que ainda que a energia seja constante em todos os modelos, na medida em que há aumento da área do martelo de compactação pode haver o aumento da profundidade de melhoria, corroborando ao citado por Young (1993). Contudo, Gu e Lee (2002) demonstraram que ocorre atenuação do efeito de melhoria do solo pelo aumento do raio da base de contato do martelo, como pode ser visto na Figura 39.

²¹ Lukas, R. G. (1986) **Dynamic Compaction for Highway Construction, Volume 1: Design and Construction Guidelines**, FHWA Report Rd-86/133. Federal Highway Administration.

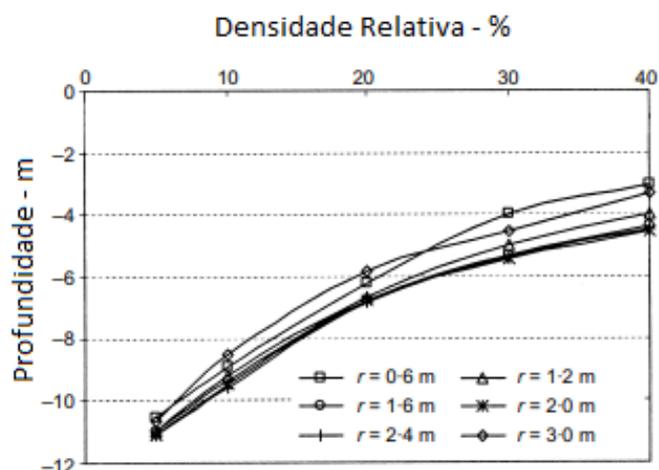


Figura 39 – Efeito da variação do raio da base na profundidade de melhoria do solo. (Fonte: Gu e Lee, 2002)

A profundidade de melhoria, inicialmente aumenta com o aumento e posteriormente diminui. Com isso, foi percebido que a profundidade máxima de melhoria é alcançada com dimensões intermediárias do raio do martelo. Wang *et al.* (2019b) concluíram que a resposta da zona liquefeita em solos granulares saturados torna-se mais eficiente conforme há redução do raio do martelo de compactação. Quanto maior o raio há uma tendência de alargamento da zona liquefeita, porém há uma redução da sua profundidade.

Lukas (1995) ao considerar os custos envolvidos na técnica observou que a energia variaria de acordo ao equipamento utilizado, quanto maiores forem as energias conseqüentemente se utilizaria equipamento de maior porte, mais robusto e mais caro. Além disso, sugeriu uma tabela (ver a Tabela 8) informando a relação entre a magnitude do martelo de compactação com o equipamento (*Crawler Crane*) e a bitola do cabeamento.

Tabela 8 – Especificações de peso e cabos em função do porte do equipamento. (Fonte: Lukas,1995)

Martelo de compactação (t)	Tipo de Crawler Crane (t)	Diâmetro do cabo (mm)
5,4 - 7,3	36,3 - 45,4	19 -22
7,3 - 12,7	45,4 - 90,7	22 - 25
12,7 - 16,3	90,7 - 113,4	25 - 29
16,3 - 22,7	136,1 - 158,8	32 - 38

Arslan *et al.* (2007) estudaram a forma do fundo do peso compactador e concluíram nas avaliações em modelos físicos que a geometria de fundo influencia na eficiência da compactação dinâmica. A profundidade da cratera e a área da cratera são afetadas positivamente pelos pesos com fundo cônico em comparação aos pesos de fundo plano. A profundidade máxima da cratera e a área da cratera alcançada no final da décima queda dos pesos com fundo plano foram alcançadas após quatro a sete golpes dos pesos com fundo cônico. Assim, a energia consumida para obter uma determinada quantidade de melhoria com os pesos compactadores de fundo cônico é menor do que a metade com os pesos compactadores de fundo plano.

Mehdipour e Hamidi (2017) utilizaram o *software* ABAQUS® para conceber uma modelagem tridimensional em MEF da compactação dinâmica considerando diferentes formas de pesos de compactação, variações da profundidade da cratera e do volume da cratera gerada em função dos resultados de Arslan *et al.* (2007). Posteriormente compararam com diferentes formas de densificação para investigar as eficiências vertical e radial do processo de compactação dinâmica usando compactadores planos e cônicos. Através deste estudo foi observado que a profundidade de influência diminuiu com o aumento da densidade relativa, cujos deslocamentos e deformações mais verticais ocorreram em solos fofos e muito fofos comparados com o do meio compacto.

Além disso, os mesmos autores concluíram que os pesos compactadores com base cônica atingiram profundidades de crateras maiores em comparação com as planas, em função da menor área de contato e concentração de tensões na ponta do cone. Os contornos da tensão atingiram as camadas inferiores do solo quando o ângulo do cone (base do martelo de compactação) aumentou, resultando em melhorias do solo.

Por fim, contrariamente à melhoria em sentido vertical, na direção radial, os martelos de base reta (plana) são mais eficazes em comparação aos martelos compactadores de base cônica, com isso as distâncias de compactação dos martelos compactadores de base cônica devem ser menores para que se alcance a sobreposição.

2.6.6 Procedimento de controle do melhoramento por compactação dinâmica/ substituição dinâmica

Craig (2012) afirmou que a efetividade da técnica pode ser garantida através de testes *in situ* de penetração, provas de carga e uso de piezômetros para avaliar a dissipação da poropressão em solos finos e acrescentou que testes iniciais são realizados para determinação de um

procedimento de compactação ótima (energia ótima de queda, frequência de queda e espaçamento dos pontos de densificação). Quanto ao monitoramento e controle geotécnico da substituição dinâmica, pelo fato de o processo ser análogo a compactação dinâmica, os procedimentos são semelhantes. Algumas fontes [e.g, Lukas, 1995; Kopf *et al.*, 2010; e Narendranathan e Lee, 2015] elencaram alguns métodos que podem ser utilizados, como:

- a) Testes de penetração padrão como SPT, CPTe PMT [e.g., Chow *et al.*, 1990; Miao *et al.*, 2006; Hamidi, 2011; Michelin *et al.* 2015; Tarawneh *et al.*, 2017; Tarawneh *et al.*, 2019];
- b) Medição da poropressão (sugestivamente o CPTu);
- c) Medição de rendimento da compactação (valores médios ou profundidade dos pontos de compactação, ou seja, buracos criados pelos impactos), [e.g., Mayne *et al.* 1984; Rollins e Kim, 2010; Hamidi, 2011; Slocombe, 2013; Rizzon, 2016; e Giese, 2019];
- d) SASW [e.g, Van Impe e Bouozza, 1996) ou CSW. Em relação ao CSW, este tem uma capacidade de longo alcance que torna o possível controlar a melhoria do solo profundo [e.g, Miao *et al.*, 2006];
- e) Medições de vibração com uso de acelerômetros ou sismógrafo [e.g., Lupiezowiec e Kanty. 2015; Michelin *et al.*, 2015; e Hwange Tu, 2006).

Fernandes (2011) salientou a importância de verificação da eficácia através de ensaios de campo baseados em SPT e CPT. Hwang e Tu (2006) concluíram que quanto maior a energia de compactação, maior a vibração e mais rápida é a taxa de atenuação. Aparentemente o solo apresenta um limite para energia vibratória e com isso quando a altura de queda do martelo é superior a uma certa determinada altura (altura limite), a influência da energia de compactação quanto as vibrações induzidas tornam-se insignificantes.

O' Brien e Guptan (1984) discriminaram as técnicas de controle e monitoramento utilizadas nas plantas de fertilizantes e automobilista de Bangladesh e Espanha, respectivamente. Nestes projetos foram usadas a técnicas acima supracitadas com a adição do monitoramento do aumento na tensão efetiva horizontal, como uma medida de densificação e um efeito de consolidação devido às batidas. Alguns pesquisadores utilizaram as medidas de desaceleração do martelo para verificar a eficiência da profundidade de melhoria [e.g., Mayne e Jones, 1983; Chow *et al.*, 1990], Giese (2019) mediu a força G do martelo de compactação com uso de medição de aceleração por medição do deslocamento do martelo por frames de filmagem em função do tempo através do software *Tracker*.

Como mencionado no item 2.5.2.1, o uso de tubos-guia para monitorar os deslocamentos horizontais nas proximidades de trechos urbanos podem gerar garantias quanto a preservação

dos sistemas públicos de abastecimento e coleta. O uso deste tipo de monitoramento foi apresentado nos estudos de Giese (2019), Lukas (1995) e Miao *et al.* (2006).

2.7 EXEMPLOS DE MODELAGEM NUMÉRICA PARA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DINÂMICA E SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA

Neste tópico serão apresentadas formulações e teorias utilizadas na concepção das modelagens numéricas aplicadas à técnica de compactação dinâmica e da substituição dinâmica em diversos solos com abordagem unidimensional, bidimensional e tridimensional.

2.7.1 Modelagem numérica unidimensional

A resposta do solo durante o impacto de alta energia é ainda complexa, e não é bem compreendida. Até agora, apenas alguns modelos analíticos foram sugeridos para explicar o comportamento complexo do solo durante o impacto de alta energia. Chow *et al.* (1988) e Lee *et al.* (1988) simularam elementos unidimensionais com um modo de deformação axial conectado aos nós com as molas do solo e *dashpots* (amortecedor viscoelástico) anexados a esses nós, conhecido como modelo da equação unidimensional da onda informado na Equação (26). Chow *et al.* (1990) usaram o método para estimar o grau e a profundidade melhoria após o golpe de compactação em solos granulares fofos a partir de comparações de medidas de desaceleração do martelo entre o real e o medido no ensaio.

$$\rho_v \cdot A \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + C_v \frac{\partial W}{\partial t} - M_t A \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + K_s W = 0 \quad (26)$$

Tanto o martelo de compactação quanto a coluna do solo são discretizados em elementos unidimensionais com um modo de deformação axial, conforme Figura 40. A resposta da coluna do solo é aproximada pela compressão axial unidimensional do solo sob tensão lateral zero. Scott e Pearce (1975) sugeriram um modelo unidimensional para simular o comportamento do solo sob alto impacto energético. O modelo, no entanto, parece ter encontrado pouca aplicação prática.

Os modelos unidimensionais de Mayne e Jones (1983) e Holeyman (1985) parecem ter sido amplamente utilizados para estimar as tensões de impacto. Ghassemi, *et al.* (2009) enfatizam

que a principal limitação dos modelos unidimensionais é que nenhuma informação pode ser obtida sobre a extensão lateral da melhoria. Chow *et al.* (1992) afirmaram que o comportamento da coluna de solo é altamente não-linear sob impacto de alta energia durante a compactação dinâmica, e é aproximado pelo comportamento não-linear de tensão vs deformação axial da areia em testes de tensão uniaxial.

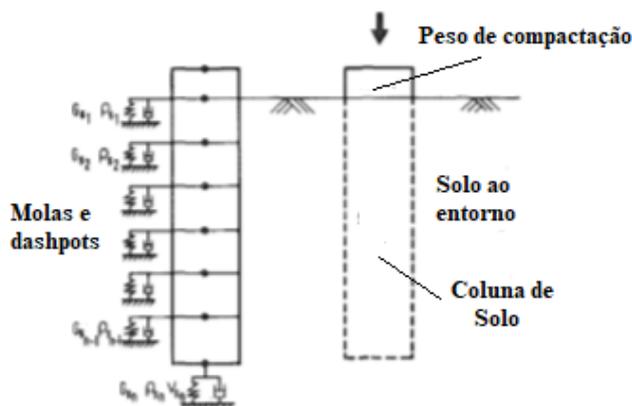


Figura 40 – Esquema de avaliação da compactação dinâmica através da abordagem unidimensional. (Fonte: Chow *et al.*,1990)

2.7.2 Modelagem numérica bidimensional

Métodos de diferenças finitas e elementos de contorno usados por Qian (1986), usando um modelo de solo empírico, foram aplicados na estimativa da penetração do peso durante o impacto. Nos anos 90, foram produzidos estudos para o entendimento da propagação de ondas de impacto através de modelos numéricos bidimensionais. Póran e Rodriguez (1992) simularam numericamente a compactação dinâmica de areia seca induzida por repetidos golpes de um martelo de compactação rígido. Foram usados dois programas que utilizam elementos isoparamétricos bilineares de quatro nós e uma formulação lagrangiana com taxa de tensões de *Jaumann* para considerar grandes deformações.

O primeiro é uma modificação do código proposto por Salah-Mars (1989) para adequar a repetição de impactos dinâmicos em areias secas, a partir do uso de um algoritmo para integração temporal, baseado em um preditor explícito, algoritmo implícito multi-corretor. A composição da equação do movimento é informada na equação (27):

$$(\{M\} + \gamma \Delta t \{C\} + \beta \Delta t^2 \{K\}) \{\alpha\}_{n+1} = \{F\}_{n+1} - \{C\} \{v'\}_{n+1} - \{K'\} \{d'\}_{n+1} \quad (27)$$

Método da substituição dinâmica aplicado a solo laterítico argiloso

O $\{C\}$ foi é através da combinação linear entre $\{M\}$ e $\{K\}$. Quanto aos deslocamentos e as velocidades, ambos são calculados a partir das equações (28) e (29):

$$\{d'\}_{n+1} = \{d'\}_n + \Delta t \{v\}_n + \Delta t^2 (0,5 - \beta_a) \{\alpha\}_n \quad (28)$$

$$\{v'\}_{n+1} = \{v\}_n + \Delta t (1 - \gamma_a) \{\alpha\}_n \quad (29)$$

A equação de movimento é empregada em α_{n+1} e este valor é usado na fase corretora para atualizar deslocamentos e velocidades como segue nas equações (30) e (31):

$$\{d\}_{n+1} = \{d'\}_{n+1} + \Delta t^2 \beta_a \{\alpha\}_{n+1} \quad (30)$$

$$\{v\}_{n+1} = \{v'\}_n + \Delta t \gamma_a \{\alpha\}_{n+1} \quad (31)$$

Os parâmetros do algoritmo γ_a e β_a dispuseram de valores γ_a igual a 0,50 e β_a igual a 0,25 para o método de aceleração média. Similar ao método de elementos finitos bidimensionais proposto por Hallquist (1988), em que há uma diferença central de formulação explícita com controle de período automático para a integração de tempo. O movimento é avançado explicitamente pelo balanço do momento global, cujo algoritmo da solução da equação é espacialmente discretizada, conforme equação (32):

$$\{M\} \{\alpha\} + \{F\} = \{P\} \quad (32)$$

Os cálculos destas variáveis são realizados a partir das equações (33), (34) e (35):

$$\{\alpha\}_n = \{M\}^{-1} (\{P\}_n - \{F\}_n) \quad (33)$$

$$\{v\}_{n+(1/2)} = \{v\}_{n-(1/2)} - \Delta t \{\alpha\}_n \quad (34)$$

$$\{d\}_{n+1} = \{d\}_n + \Delta t \{v\}_{n+(1/2)} \quad (35)$$

A integração das equações constitutivas foi realizada por um procedimento linear e um retorno radial é utilizado para atualização da tensão. O domínio e o contradomínio são definidos

para qualquer interface de contato. Durante a interação, uma metade da massa de cada elemento no lado do contradomínio em contato é distribuída para a área de superfície do domínio coberta. A distribuição de pressão para a área de superfície do domínio que recebeu a massa é determinada a partir da tensão interna no elemento associado. Depois de completada essa distribuição de massa e pressão, a aceleração da superfície do domínio é atualizada.

Lee e Gu (2004) propuseram um método para estimar o grau e a profundidade de melhoria resultante da compactação dinâmica em areias. O método foi baseado em extensas análises de elementos finitos bidimensionais e comparado com resultados de modelos físicos centrifugados. Estes utilizaram uma malha FE bidimensional e axissimétrica, mostrada na Figura 41, para modelar o impacto do martelo de compactação sobre o solo.

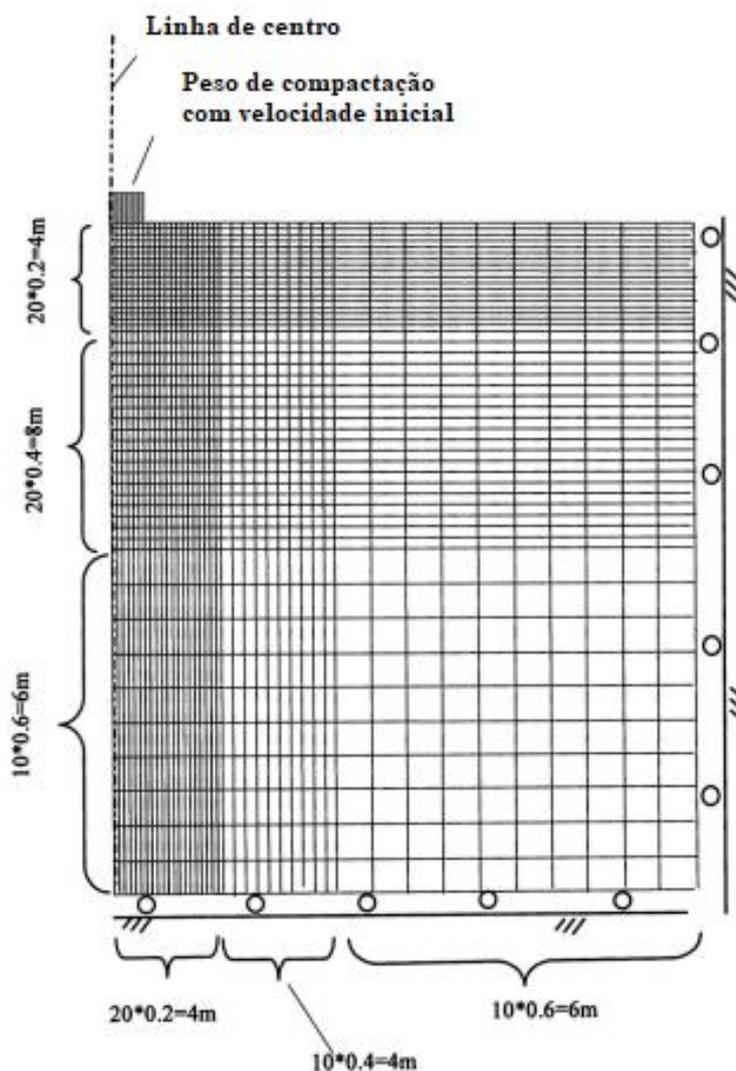


Figura 41 – Modelo axissimétrico em elemento finito com abordagem bidimensional. (Fonte: Lee e Gu,2004)

O modelo constitutivo usado para a compactação dinâmica é o modelo limite proposto por Dimaggio e Sandler²² (1971) para explosões e dinâmica em solos associado a uma lei de endurecimento volumétrico não-linear. Além disso, o estudo foi formado a partir de três combinações de altura e peso de queda, com equivalências de protótipo de 200 kN liberado a 20 m de altura, 400 kN solto a 10 m de altura e 800 kN solto a 5 m de altura, em experimentos realizados na centrífuga. A energia por golpe para esses três casos foi a mesma, enquanto o momento por golpe variou de 4000 a 8000 kN.m/s. O raio e a área de base do martelo de compactação circular foram de cerca de 1,2 m e 4 m², respectivamente.

Pan e Selby (2001) simularam a compactação dinâmica em solos fofos sob impacto através de modelagem computacional, usando ABAQUS® com o objetivo de compreender a resposta dos impactos do corpo rígido em um meio composto por elementos finitos elastoplástico axissimétrico de representação dos solos. A modelagem foi capaz de simular a onda P propagada no solo de forma eficaz. Em termos de velocidade de aceleração de partículas, nos primeiros golpes foi muito menor comparado ao segundo e ao terceiro golpe. As medidas de aceleração do segundo e do terceiro golpe foram semelhantes, indicando que tratamento adicional além do terceiro golpe tem um efeito redutor na melhoria do solo menos resistente em profundidade.

Mustafa (2010) obteve como resposta do modelo numérico bidimensional axissimétrico que a distribuição do índice de vazios variou em três zonas específicas, conforme Figura 42.

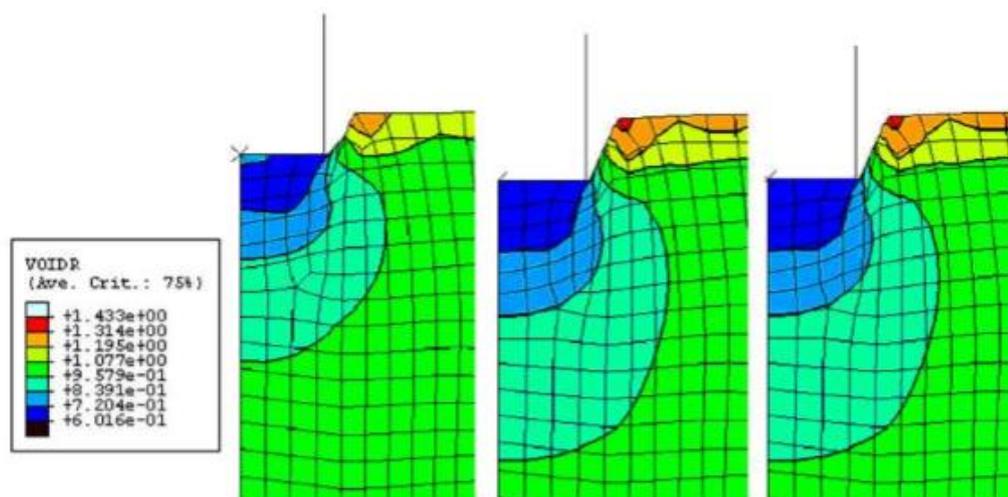


Figura 42 – Distribuição de índice de vazios de 1 a 3 golpes através de uma abordagem bidimensional axissimétrica do método dos elementos finitos. (Fonte: Mostafa, 2010)

²² Dimaggio, F. L. e Sandler, I. S. (1971) "Material models for granular soils." *Journal Engineering. Mechanics Division*, ASCE, vol.97, n°3, pp. 935-950.

A primeira zona (em azul) apresentou um índice de vazios inferior ao índice de vazios inicial. A extensão vertical e lateral do tratamento foi observada e propagou-se verticalmente e horizontalmente com a sequência de golpes. A segunda zona (avermelhada) está localizada acima da base da cratera e em torno da periferia do martelo de compactação, onde o aumento da taxa de vazios ocorreu. Por fim, a terceira zona (verde) que é a zona que não houve mudança no índice de vazios do solo.

Além deste também, Ghanbari e Hamidi (2015) estudaram o melhoramento das propriedades do solo através da compactação dinâmica em regiões adjacentes a taludes usando do método dos elementos finitos bidimensional do ABAQUS®.

Em termos de *Dynamic Replacement*, Solowski *et al.* (2013) utilizaram o método do ponto material para simular o comportamento da formação da coluna granular de DR gerada através de modelo físico usando modelos constitutivos básicos. No experimento, a coluna de material granular foi criada em uma caixa transparente preenchida com serragem até 53 cm de profundidade. Posteriormente, a serragem foi compactada com pressão de aproximadamente 1,7 kPa. Após a compactação, iniciou-se um experimento de sete etapas (ver a Figura 43).

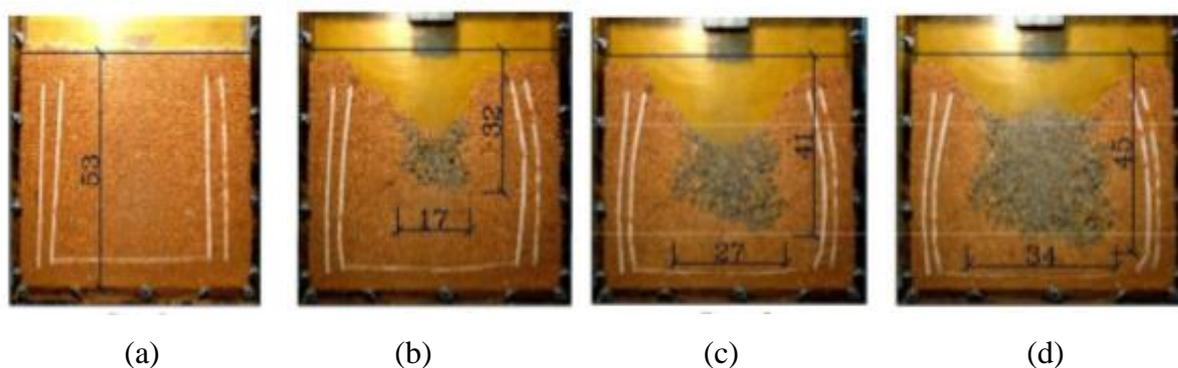


Figura 43 – Formações de colunas granulares DR: a) Fase inicial; b) Estágio 3; c) Estágio 5; d) Estágio 7. (Fonte: Solowski *et al.*, 2013)

Em cada estágio, o solo foi impactado por um compactador (uma ou várias vezes). O compactador tinha formato de barril, com diâmetro inferior e superior de 9 cm e diâmetro central de 10,5 cm, com altura de queda de 20 cm e massa de aproximadamente 10,1 kg. Como é possível observar na Figura 44, a junção dos modelos constitutivos de comuns [i.e., Modelo de Barcelona e *Mohr-Coulomb*] uso na geotecnia atrelado ao uso método do ponto material apresentou resultados convergentes com os dados do modelo físico. Embora no estágio 5, o modelo tenha apresentado distorções visíveis, isso não afetou a precisão da representatividade da modelagem.

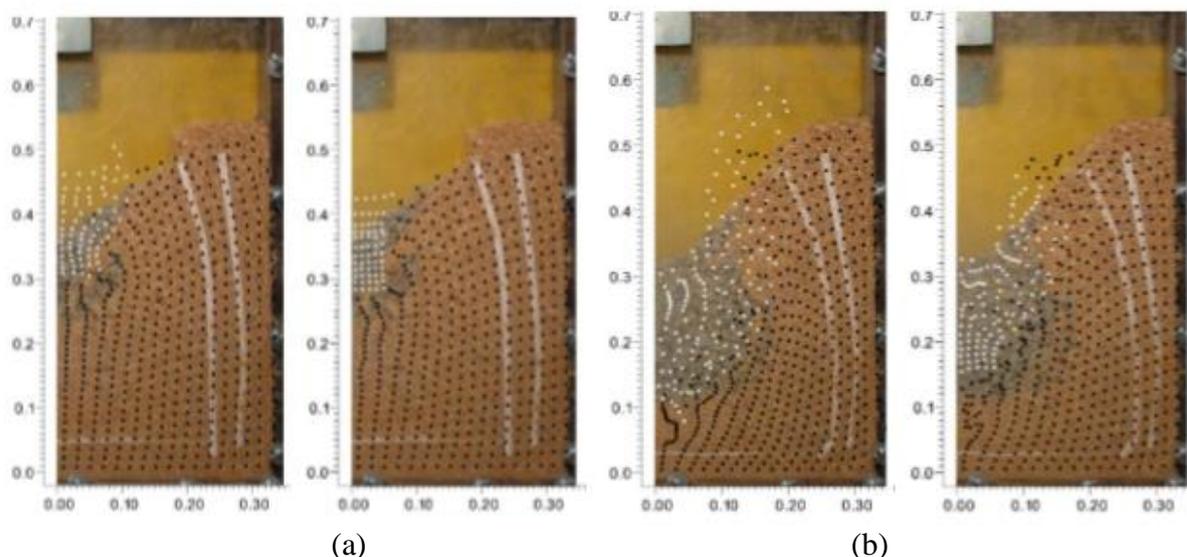


Figura 44 – Comparação entre fenômeno de formação de colunas granulares DR com os resultados da aplicação do método do ponto material: a) Estágio 3; b) Estágio 5. (Fonte: Solowski *et al.*, 2013)

2.7.3 Modelagem numérica tridimensional

Tarawneh *et al.* (2019) avaliaram a relação carga *vs* deslocamento do solo de acordo com o método de Schmertman [e.g., SCHUMERTMANN²³, 1970; SCHUMERTMANN *et al.*²⁴ 1978] com um fator α revisado para a fórmula do módulo de elasticidade é simulada usando o método dos elementos finitos no *software* ABAQUS®, conforme Figura 45. O domínio do elemento finito é definido de modo a representar o menor padrão repetitivo definido na área tratada. Esse padrão consiste em uma célula quadrada (de comprimento lateral igual a 6m) que contém colunas de DR de 2 metros de diâmetro no meio e um quarto de colunas de DR em cada canto da célula, espaçados em 6 m centro a centro.

O modelo constitutivo adotado foi o de *Drucker-Prager* para descrever o comportamento mecânico do sistema do solo após a aplicação dos esquemas de substituição dinâmica. Os parâmetros do modelo foram interpretados usando os resultados dos testes de CPT e carregamento realizados na área após a aplicação dos procedimentos de substituição dinâmica.

²³SCHMERTMANN, H.. Static cone to compute static settlement over sand. **Journal soil mechanics and foundations division**, Vol. 96, n°3, 1970, pp. 1011-1043.

²⁴SCHMERTMANN, H., BROWN, P.R., HARTMAN, J.P. Improved strain influence factor diagrams. **Journal Geotechnical Engineering**, vol. 104, n°8, 1978, pp. 1131-1135.

Foram introduzidos os parâmetros de resistência c' e φ' do solo (modelo *Mohr-Coulomb*) e depois transformados em parâmetros equivalentes para o modelo *Drucker-Prager*. Outras parâmetros introduzidos foram o módulo de elasticidade ($E_{\text{young}} = 5q_c$) e o rendimento inicial da capa de endurecimento. (Tarawneh *et al.*, 2019)

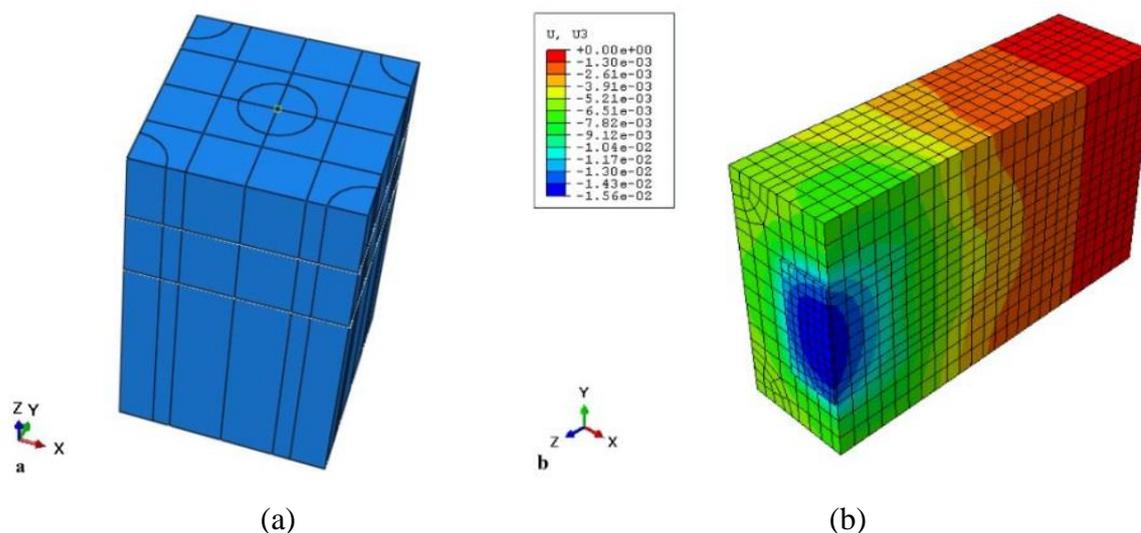


Figura 45 – Simulação numérica de um caso de coluna DR: a) Modelagem computacional de uma coluna de areia DR no ABAQUS®; b) Resultados dos deslocamentos sofridos após simulação por elementos finitos com carga final (225kPa). (Fonte: Tarawneh *et al.*, 2019)

O modelo geométrico foi montado com fixação geotécnica padrão, ou seja, os limites verticais do modelo permitiam o movimento na direção paralela (vertical), enquanto a base do modelo era estruturada para ser totalmente fixa (apoios fixos). A interação na interface horizontal foi considerada em função do contato considerando o coeficiente de atrito de 0,67 e o contato duro (*Hard contact*). As interfaces verticais foram tratadas como limites de continuidade. O modelo foi discretizado em 6.000 elementos de tensão hexaédrico linear para que o solo pudesse ativar cálculos de propressão e 148 elementos de tensão hexaédrico linear para a chapa de aço usada para aplicação da carga. (Tarawneh *et al.*, 2019)

Ao comparar as respostas do modelo numérico e a prova de carga realizada, segundo a ASTM D1196/D1196M-12(2016), foi possível notar que houve uma boa concordância entre as cargas e os deslocamentos finais, embora o modelo não tenha representado bem a rigidez da coluna nos primeiros estágios de carga vs deslocamento.

2.8 MELHORAMENTO DE SOLOS – SOLOS TRATADOS COM CIMENTO E SOLO-CIMENTO

As propriedades e parâmetros do solo podem ser modificadas por intermédio de várias alternativas no campo da engenharia da geotécnica, seja pela utilização de reforço (geossintéticos), elementos drenantes, compactação ou introdução de agentes químicos.

A estabilização dos solos a partir da adição de cimento Portland representa uma alternativa bastante estudada e utilizada em todo mundo em função das melhoras obtidas através da modificação das propriedades e parâmetros do solo. [e.g., Fahmy (1954); Herzog and Mitchel (1963); Mitchel (1981); Prietto (1996); Rohlfes Junior (1996); Senço (2001); Vendruscolo (2003); Rotta *et al.* (2003); Foppa (2005); Consoli *et al.* (2007); Cruz (2008); Vitali (2008); ACI (2009); Consoli *et al.* (2011); Consoli *et al.* (2012a); Consoli *et al.* (2012b); Floss (2012); Marques *et al.* (2014); Forcellini *et al.* (2016)]. Neste tópico foram informados aspectos relevantes a história, aplicações, conceitos e estudos recentes na área e comportamentos de solos artificialmente cimentados.

2.8.1 Aplicações de solos tratados com cimento e misturas de solo-cimento

Mitchel (1981) afirmou que, de uma forma geral, as adições de agentes químicos [e.g cimento e cal] em solos objetivam estabelecer: a estabilização volumétrica; resistência ao cisalhamento; e das propriedades referentes à tensão *vs* deformação, permeabilidade e durabilidade.

PCA (1995) elencou uma gama de aplicações comuns de misturas de solo-cimento, tais como: edificações (Inglês e Metcalf, 1972), rodovias, estradas, acostamentos, aeroportos, estacionamentos, sub-bases de pavimentos rígidos e flexíveis, ampliações de pistas, revitalização de pavimentos, áreas de armazenamentos, proteção de taludes de barragens, estabilização de fundações, reservatórios e proteção de lagoas, canais e revestimentos de valas e estabilização de subestações. Existem outros trabalhos na literatura que confirmam a variedade de aplicações das misturas de solo-cimento [e.g., Ingles and Metcalf (1972); Mitchel (1981); Prietto, (1996); Senço (2001); Vendruscolo (2003); Foppa (2005); Consoli *et al.* (2007); Cruz (2008); Vitali (2008); ACI (2009); Consoli *et al.* (2011); Consoli *et al.* (2012a); Consoli *et al.* (2012b); Floss (2012); Forcellini *et al.* (2016)].

Consoli *et al.* (2012a) complementaram que a adição de cimento em solos consiste em uma alternativa técnica interessante quando ocorrem necessidades técnicas de projeto, cuja melhoria do solo local baseia-se no impedimento de liquefação de solos arenosos.

USACE (1995) traz à tona a aplicação cimento para atender critérios de caráter ambiental através da estabilização e solidificação dos solos. Sendo a técnica aplicável para o tratamento de líquidos, solos e lamas contaminadas. A solidificação/estabilização de solos contaminados ocorre para melhorar o manuseio e características físicas dos resíduos, diminuir a área da superfície da massa de resíduos gerada pela presença de contaminantes e reduzir a solubilidade de constituintes perigosos. Cabe salientar que a característica do produto (solo tratado) de um processo de solidificação/estabilização pode variar de um material granular a um sólido coesivo, dependendo da quantidade de reagentes adicionados e do tipo de resíduo a ser tratado.

A técnica do solo-cimento tem servido como material de revestimento de baixa permeabilidade por mais de 40 anos. Durante meados da década de 1950, muitos reservatórios agrícolas com dimensões de 0,4 a 0,8 hectares foram revestidos com camadas de solo-cimento com espessuras de 100 a 150 mm no sul da Califórnia. O maior projeto de lago revestido com solo-cimento foi no Lago *Cahuilla*, sendo ele um reservatório de regulação do terminal para o sistema de irrigação do Distrito de Água do Condado de *Coachella Valley* localizado no sul da Califórnia. Uma vez concluído em 1969, o fundo do reservatório com 55 hectares teve um revestimento de solo-cimento com 150 mm de espessura, e os aterros de areia que formavam o reservatório foram produzidos com 600 mm de solo-cimento normal à encosta. (USACE, 1995)

2.8.2 Distinções entre solos tratados com cimento vs solo-cimento

PCA (1995) informou que existem 2 tipos de possíveis misturas de solo com cimento, que são solo-cimento e solos modificados com cimento.

Em termos conceituais, Vitali (2008, p.22) citou que o solo - cimento é:

“... é um material estrutural em que a porcentagem de cimento é suficiente para conferir determinadas propriedades mecânicas e de durabilidade às misturas, depois de compactadas com um determinado teor em água que garanta a hidratação do cimento.”

ACI (2009, p.3) conceitua como “uma mistura de solo com quantidades medidas de cimento Portland e água, compactado a uma alta densidade”. A mesma fonte citou que o cimento é incorporado ao solo para permitir a aderência entre partículas, porém distingue-se do

concreto pois a partícula não é totalmente revestida por pasta de cimento. O solo modificado com cimento diferencia-se do solo-cimento pois normalmente satisfaz aspectos referentes a durabilidade e a resistência à compressão ao cisalhamento, ou ambos, de modo que ele possa resistir efetivamente ao carregamento estrutural (e.g., base de pavimentação) e ambiental (e.g., congelamento e descongelamento, secagem e umedecimento e erosão sob condições de fluxo). Em PCA (1995) foi abordado que os solos utilizados nestas misturas podem ser areias, siltes, argilas, cascalhos, rochas trituradas e materiais locais (e.g., escória, caliche e rochas calcárias).

Segundo Ingles e Metcalf (1972), o incremento de um teor de cimento diminuto, de até 2 %, possibilita modificação nas propriedades dos solos, enquanto os teores maiores alteram radicalmente as suas propriedades. Mitchel (1981) afirmou que a introdução de teores entre 3% a 10% de cimento Portland, em relação a massa seca do solo, representa um incremento adequado para tratamento de solos granulares e solos de baixa plasticidade. Assim como ACI (2009), em PCA (1995) foi mencionado que as misturas de solo-cimento devem satisfazer critérios de durabilidade (i.e., ensaios degelo/degelo e molhagem/secagem com base na limites de perda de massa estabelecidos).

Vitali (2008) conceituou solo modificado com cimento como:

“... um material melhorado, com uma porcentagem de cimento insuficiente para lhe conferir características de estabilização e durabilidade inerentes ao solo-cimento, pelo que este se fragmenta sob a ação do tráfego de obra e funciona como um material granular.”

Em PCA (1995) foi explicado que o objetivo do tratamento “é alterar propriedades indesejáveis de solos problemáticos ou materiais abaixo do padrão, de modo que eles sejam adequados para uso na construção”. Vitali (2008) complementou que os solos tratados com cimento são empregues em aterros e em leitos de pavimento, cujo objetivo do tratamento é a obtenção de um melhoramento imediato das propriedades mecânicas do solo, para que seja possível a sua compactação e trafegabilidade.

No Brasil e no mundo, a utilização de solo melhorado com cimento Portland é bastante praticada por meio da técnica *Deep soil mixing* e/ou *Cutter soil mixing* em obras de infraestrutura, rodovias, portuárias, barragens, armazéns etc. Especificamente as colunas de *Deep soil mixing* podem atingir profundidades em torno de 20m, são comercialmente dispostas em diâmetros de 40 cm a 100 cm, com resistências ao cisalhamento na faixa de 3 MPa.

A modificação do solo com pequenas quantidades de cimento Portland permite que haja: redução da plasticidade (IP); redução na quantidade de silte e argila; aumento do ISC; aumento

da resistência ao cisalhamento do solo e estabilização das propriedades volumétricas. (PCA,1995)

2.8.3 Estudos de solos tratados com cimento e misturas de solo-cimento

Clough *et al.* (1981) estudaram quatro areias naturalmente cimentadas (a partir de amostras indeformadas) encontradas na área da baía de *San Francisco* (EUA) e areia artificialmente cimentada produzida para simular o comportamento natural do solo. As amostras cimentadas artificialmente foram analisadas em função do teor de agente cimentante e da densidade da mistura. Baseado nesta pesquisa, como resposta, o agente cimentante (Cimento Portland tipo II) produzia um material com duas componentes resistentes pela cimentação propriamente dita e pelo atrito entre partículas, sendo que o φ' das areias cimentadas e não cimentadas foram similares.

Ainda neste trabalho, os mesmos autores concluíram que a densidade, distribuição granulométrica, formato dos grãos e o arranjo dos grãos são parâmetros significativos no comportamento das areias cimentadas. E ainda a areia fracamente cimentada demonstrou um modo de ruptura frágil em baixas tensões confinantes transitando para um modo de ruptura dúctil em tensões confinantes mais altas.

Larnach (1960) estudou misturas de areias finas e argilas com 3 proporções distintas de teores de cimento, a partir de ensaios de resistência à compressão axial e resistência de flexão em vigotas, considerando também outras variáveis como teor de umidade e massa específicas seca aparente, percebeu que a razão entre a quantidade de vazios e a quantidade de cimento de uma mistura de solo-cimento se revelou significativa para estimativa da resistência solo-cimento. Portanto, o mesmo autor propôs a equação (36) e avaliou a relação do mesmo com q_u :

$$\frac{V_v}{V_{ci}} \geq q_u \quad (36)$$

A Figura 46 ilustra a relação ajustada entre q_u vs V_v/V_{ci} que Larnach (1960) obteve como resposta a partir do experimento realizado em solos artificialmente cimentados e curados por um período de 7 dias. Prietto (1996) e Schnaid *et al.* (2001) baseados em seus estudos concluíram que o comportamento mecânico destes solos é influenciado pela variação do grau de cimentação e pela tensão efetiva média inicial, sendo o modo de ruptura e o módulo de deformação relacionados com ambos os parâmetros.

Rohlfes Junior (1996) realizou misturas de solo-cimento experimentais com o uso do solo residual de Cachoeirinha/RS (Campo Experimental da UFRGS) incorporando teores de 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15% e 17% de cimento CP IV-32 e foram obtidos valores de resistência à compressão axial de 0,141 MPa até 2,88 MPa em função do aumento do teor.

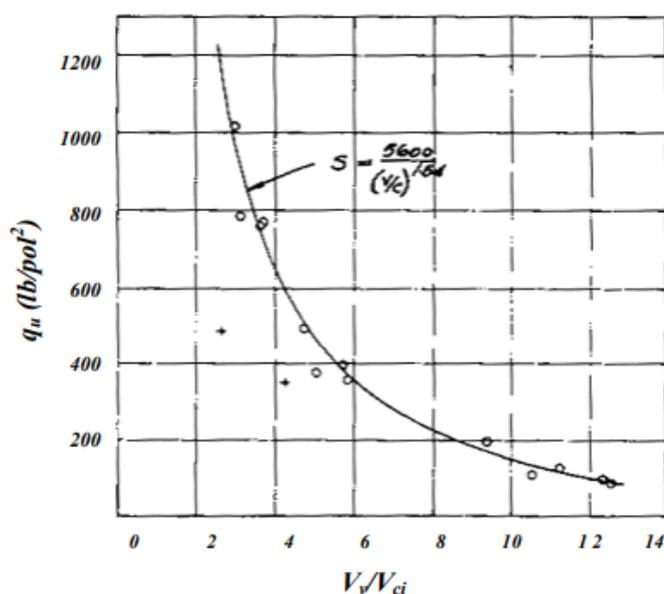


Figura 46 – Relação V_v/V_{ci} vs q_u . (Fonte: adaptado de LARNACH, 1960)

Tendo em vista que a cimentação de depósitos sedimentares pode ocorrer em diferentes níveis de tensões geostáticas, ou seja, com diferentes tensões confinantes e índice de vazios, naturalmente a extração de amostras indeformadas é prejudicada. Rotta *et al.* (2003) aplicou a técnica da cura sob tensão com tensões confinantes isotrópicas em solos granulares de Porto Alegre – SC artificialmente cimentados com teores entre 1% e 3% de cimento, índice de vazios entre 0,43 e 0,65 e tensões confinantes entre 0 e 2000 kPa. Os resultados dos testes permitiram avaliar a contribuição das ligações cimentícias no comportamento volumétrico do solo cimentado, bem como a variação nas tensões de rendimento primário e incremental na compressão isotrópica em função do índice de vazios de cura, sendo então constatada a importância do índice de vazios durante a formação das ligações de cimento e do grau de cimentação no comportamento compressivo do solo cimentado. Foi constatado também que a variação na tensão de escoamento, índice de vazios e o teor de cimento é dependente da magnitude da cura sob tensão e é independente do OCR.

Ao se notar que o método empregado para dosagem de concreto, baseada em relação água/cimento, não ser apropriado para compressão do melhoramento químico do solo devido

ao elevado índice de vazios existentes e ao alto grau de saturação da mistura, Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) estudaram a influência dos parâmetros $C\%$, η e ω na compreensão de q_u de um solo argiloarenoso (SC) cimentado para compreensão dos parâmetros-chave na dosagem, conforme Figura 47.

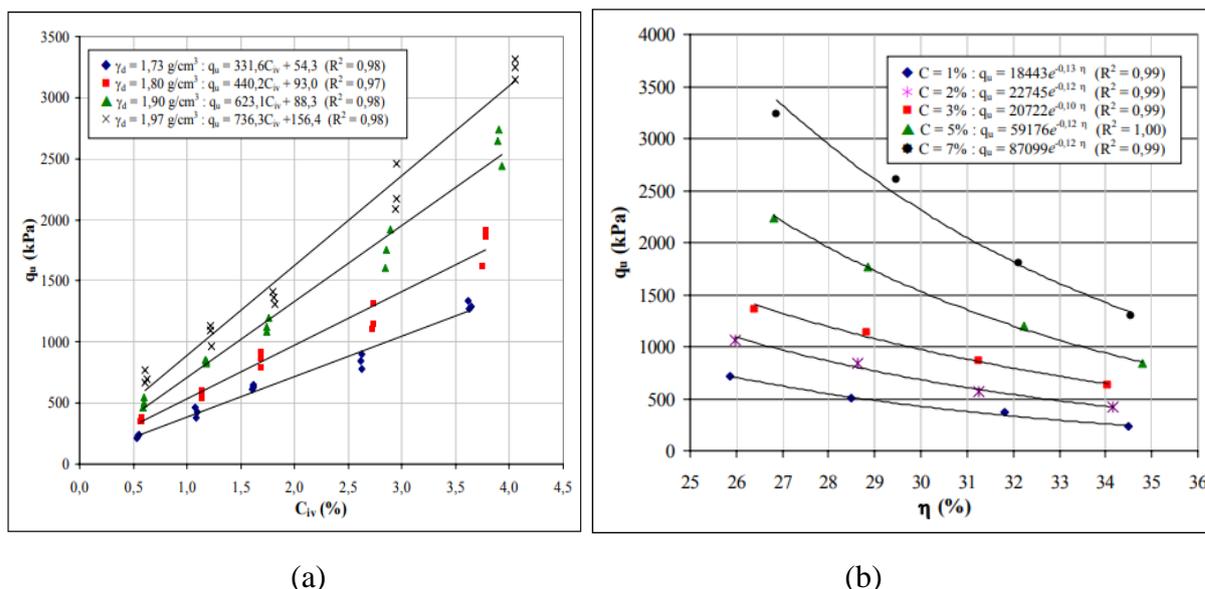


Figura 47 – Relação de parâmetros-chave no comportamento resistente do Arenito Botucatu melhorado com cimento Portland: a) q_u vs C_{iv} ; b) q_u vs η . (Fonte: Foppa, 2005)

Como resultado foi observado que q_u variava de forma crescente, com boa aproximação linear (R^2 igual ou superior a 0,97), a medida em que aumentava o $C_{iv}\%$, conforme Figura 47a. Além disso, na Figura 47b foi constatado que a medida que aumentava o η havia uma queda em proporções exponenciais de q_u , sendo mais significativa conforme a redução de $C\%$.

Por fim, quanto ao ω na moldagem foi percebido que o q_u comportou-se de forma muito similar ao que ocorre em ensaios de compactação, onde há um teor ótimo de umidade e que antes deste teor o valor q_u está em crescimento e após o mesmo, o valor de q_u comporta-se de maneira decrescente. Cabe salientar que este comportamento é variável em função de $C\%$.

Foppa (2005) apresentou pela primeira vez a função de ajuste q_u vs η/C_{iv} (ver a Figura 48) aplicada a misturas de solo-cimento (Arenito Botucatu: Cimento Portland CP V ARI), correspondendo a uma representação de comportamento normalizado que relaciona a resistência à compressão não confinada com o volume de vazios, peso específico do solo seco, teor de cimento e teor umidade.

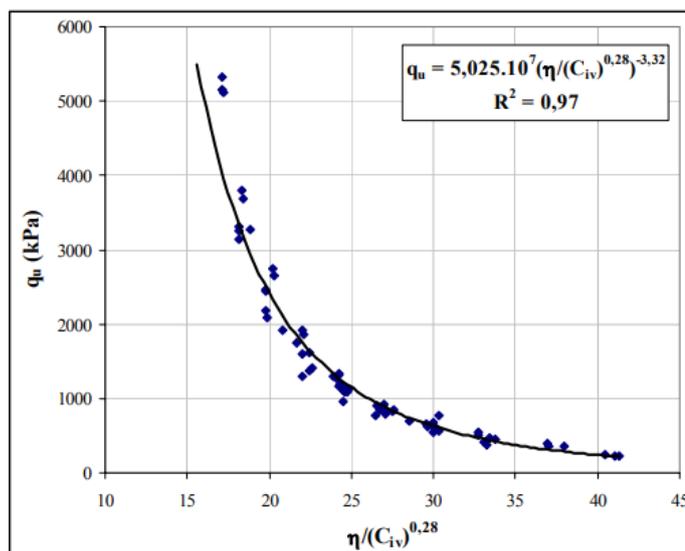


Figura 48 – Relação η/C_{iv} vs q_u do arenito melhorado com cimento. (Fonte: Foppa, 2005)

Cruz (2008) avaliou a influência dos parâmetros de rigidez, resistência e dilatância em um solo granular artificialmente cimentado (Areia de Osório com Cimento CP V-ARI) com C% iguais a 1%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% e premissa de índices de vazios (e) referentes 0,68, 0,73 e 0,80. Como conclusões, assim como em outras pesquisas de melhoramento de solos, foi obtida uma relação única entre q_u vs η/C_{iv} , cujo expoente foi igual a 1 na areia de Osório. Além disso, o parâmetro η teve uma resposta inversamente proporcional q_u e por fim o valor de q_u foi inversamente proporcional a razão V_v/V_{ci} e a razão η/C_{iv} .

Consoli *et al.* (2011) estudaram a influência dos parâmetros teor de cimento $C\%$, η , ω e a razão η/C_{iv} na compreensão de q_u de um solo siltoso argiloso cimentado e assim como nos estudos de Consoli *et al.* (2007) e Cruz (2008), foi estabelecida uma relação única entre q_u e ω , η e C_{iv} .

Consoli *et al.* (2012a) estudaram a influência da quantidade de cimento e da porosidade em um índice de vazios de cimento, definida como a razão entre o volume de cimento e o volume de vazios de uma mistura, no comportamento de tensão-dilatação de uma areia artificialmente cimentada a partir de 18 ensaios triaxiais CID com os C% variando entre 3,0 a 10,3% e os índices de vazios entre 0,69 a 0,82. Concluíram que para uma determinada razão V_{ci}/V_v e pressão confinante, o pico de resistência dos corpos de prova de solo-cimento e a curva de resposta de variação tensão-volumétrica de desvio-axial até o pico são similares, sugerindo que o parâmetro V_{ci}/V_v controla a maior parte do comportamento tensão vs deformação até o pico. Após o pico, a tensão do solo dirigia-se ao estado crítico em que o comportamento é puramente friccional.

Ainda, no mesmo estudo, foi percebido que quanto menor a tensão de confinamento ou a V_{ci}/V_v , maior é a taxa de tensão atingida, assim como da taxa máxima de dilatação. Por fim, à medida que a taxa de tensão diminuía, a localização da deformação ocorria de forma que a taxa de dilatação reduzia mais rapidamente do que a taxa de tensão, trazendo o caminho para dentro da relação de atrito esperada. Nesse ponto, as deformações calculadas perdiam seu significado físico.

Forcellini *et al.* (2016) estudaram a resistência à tração por compressão diametral e a compressão não confinada em misturas de solo-cimento (areia de Osório, cimento portland e água) com: teores de cimento de 3% e 7%; teor de umidade de 10%; três índices de vazios iguais a 0,60, 0,66 e 0,72; e idade de cura de 7, 14, 28 e 56 dias. Como resultado foi observado que a medida em que o houve o aumento do índice de vazios, as misturas respondiam com redução tanto na q_u quanto na compressão diametral em função do tempo de cura (quanto menor foi a idade de cura dos corpos de prova, menor foi a resistência mecânica em função da compressão não confinada). Por fim, pôde-se observar que o módulo de Young aumentou à medida em que teor de cimento aumentou (aumento da cimentação entre partículas), assim como o índice de vazios diminuiu (aumento da tensão efetiva do solo, assim como do atrito).

Consoli *et al.* (2012b) realizaram pesquisas para compreender os parâmetros mais significativos para o controlar a rigidez dos solos cimentados através de dois solos com diferentes granulometrias (Areia de Osório e Areia Siltosa do Porto) e quantificando a influência da razão η/C_{iv} com o módulo G_0 e o q_u . Através deste estudo foi presenciado que cada matriz de solo possui uma relação única para G_0 / q_u em relação ao parâmetro η/C_{iv} ajustado.

Consoli *et al.* (2006) estudaram o efeito da compressão isotrópica e dos ensaios de compressão não confinados em corpos-de-prova artificialmente cimentados e curados sob diferentes tensões e índices de vazios, sendo preparados com diferentes teores de cimento. Com isso, os resultados permitiram avaliar a contribuição das ligações de cimento através da compressão do solo, as mudanças nas tensões incrementais primárias (py') e incremental isotrópica ($\Delta p'$) e a variação de q_u e do módulo de bulk inicial (B_u) em função do índice de vazios e do C%.

Cruz (2008) realizou ensaios CID com uso de *bender elements* para cálculo de G_0 nas areias artificialmente cimentadas com tensões confinantes de 20k Pa, 200 kPa e 400 kPa. Como conclusões, em termos de rigidez, quanto maiores foram as tensões confinantes e os teores de cimento, conseqüentemente maiores foram as rigidezes das misturas. Entretanto quanto menor a relação V_v/V_{ci} , maior foi rigidez e o modulo de cisalhante G_{din} .

Em testes realizados em solos residuais, Marques *et al.* (2014) concluíram respostas semelhantes através de ensaios de campo e de laboratório igualmente realizados por Consoli *et al.* (2007) e Cruz (2008) a partir de uma camada de solo residual melhorada com cimento. Como também salientaram o aumento significativo da resistência da ponta, através de ensaios de CPT, após a adição do cimento em comparação aos mesmos testes no solo residual natural.

2.9 ENSAIO DE PLACA EM FUNDAÇÕES APOIADAS EM SOLOS E EM CAMADAS MELHORADAS

O ensaio de placa constitui uma alternativa técnica de previsão de capacidade de carga e faixas de deslocamentos associados a fundação superficial em função do seu carregamento, com intuito de simular o comportamento destas estruturas em condições reais de campo. O ensaio é realizado em função de estágios sucessivos de carregamento sobre uma placa apoiada diretamente no terreno, através de um macaco hidráulico e um sistema de reação (cargueiras ou conjunto de tirantes ancorados no solo). A NBR 6122 (1996, p.8) explana que a prova de carga sobre placa [i.e., ensaio de placa] é:

“...realizado de acordo com a NBR 6489, cujos resultados devem ser interpretados de modo a levar em conta as relações de comportamento entre a placa e a fundação real, bem como as características das camadas de solo influenciadas pela placa e pela fundação.”

Robertson (1986) afirmou que o ensaio de placa foi um dos primeiros ensaios desenvolvidos *in situ* para entendimento da ruptura e da deformação do solo. O módulo de deformação vertical é obtido a partir do comportamento de deslocamento de um carregamento gerado em uma placa de suporte adequada colocada em uma cota de profundidade específica. O mesmo salientou que pode ser particularmente útil em aterros, solos rochosos, argilas duras fissuradas e rochas moles, isto é, em solos que apresentam dificuldades para realização em outros testes *in situ*.

O ensaio de placa em fundações regido pela NBR 6489 (2019) estabelece critérios para realização de ensaios de prova de carga direta para fins de fundações superficiais. Nesta norma, os procedimentos e restrições preconizados para carregamento lento são os seguintes:

- “a) carga aplicada à placa em estágios sucessivos de no máximo 20% da taxa admissível provável do solo;
- b) em cada estágio de carga, os recalques serão lidos imediatamente após a aplicação desta carga e após intervalos de tempo

sucessivamente dobrados (1, 2, 4, 8, 15 minutos etc.). Só será aplicado novo acréscimo de carga depois de verificada a estabilização dos recalques (com tolerância máxima de 5% do recalque neste estágio entre leituras sucessivas);

c) O ensaio deve ser levado até pelo menos observar-se um recalque total de 25mm ou até atingir-se o dobro da taxa admitida para o solo;

d) a carga máxima alcançada no ensaio, caso não se vá até a ruptura, deve ser mantida pelo menos durante 12h;

e) a descarga deve ser feita em estágios sucessivos, não superiores a 25% da carga total, lendo-se os recalques de maneira idêntica a do carregamento e mantendo-se cada estágio até a estabilização dos recalques, dentro da precisão admitida. ”

Quanto a avaliação de tensão *vs* deslocamento por carregamento rápido, a NBR 6489 (2019) estabelece os seguintes procedimentos:

“a) carga aplicada em cada estágio não pode ser superior a 10% da carga admissível prevista para o terreno;

b) em cada estágio de carga deve ser mantida durante 10 min, independente da estabilização dos deslocamentos.”

A NBR 6489 (2019) explica que os deslocamentos devem ser lidos no início e no final de cada estágio. Além disso, atingido o carregamento máximo do ensaio, caso não sejam atingidos deslocamentos que caracterizem a ruptura geotécnica, devem ser feitas cinco leituras (10 min, 30 min, 60 min, 90 min e 120 min) neste estágio. Em seguida, iniciar a fase de descarregamento, que devem ser realizados em cinco ou mais estágios, sendo cada estágio mantido por 10 min, com leitura dos respectivos deslocamentos. Por fim, após do descarregamento total, devem ser feitas duas leituras adicionais de 30 min e 60 min.

A MB-3472 (1991) sugere que um novo estágio de carregamento só é realizado após a verificação após atingir o critério de estabilização de recalques referente a equação (37):

$$L_n - L_{n-1} < 5\% (L_n - L_1) \quad (37)$$

Casagrande (2001) elencou as vantagens deste tipo de ensaio considerando fatores técnicos e econômicos, sendo eles:

- a) Serem mais econômicos que ensaios de prova de carga em verdadeira grandeza;
- b) Adequado à avaliação de comportamento de fundações superficiais;

- c) Compreensão da forma da ruptura [i.e., interação solo-estrutural];
- d) Aplicação de uma gama de possibilidades de soluções matemáticas fechadas e procedimentos empíricos e semiempíricos para interpretação dos dados;
- e) Conhecimento sobre às condições geométricas do problema, o que conseqüentemente gera facilidade em termo de uso de soluções analíticas e numéricas (MEF).

Em termos estudos de ensaio de placa verticais para avaliação de comportamento tensão vs deformação em fundações assentes sobre solos residuais e coesivos friccionais com ou sem camadas melhoradas, parâmetros de deformabilidade e resistência destacam-se alguns os trabalhos na literatura técnica [e.g., Parry (1978); Consoli *et al.* (1998); Cudmani (1994); Sales (1999); Thomé (1999); Casagrande (2001); Vendruscolo (2003); Pantelidis (2007); Marques *et al.* (2014), Consoli *et al.* (2019), Rossi (2019) e Giese (2019)], modulo de deformação verticais e horizontais [e.g., Dimov (1993)] e Coeficiente de reação horizontal [e.g., Silva (2018)]. Pantadilis (2007) propôs um método para a determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento (c , ϕ) e de deformabilidade (E_{Young}) de solos usando o ensaio de placa.

Consoli *et al.* (1998) pesquisaram sobre a interpretação de ensaios em um solo residual homogêneo, coesivo-friccional, localizado no Campo Experimental da UFRGS. Foram realizados ensaios comparando o comportamento de carga vs recalque medido a partir de ensaios de placa com uso de chapas de aço circulares variando de 0,30 a 0,60 m de diâmetro e bases de concreto quadrado que variam em tamanho de 0,40 a 1,00 m e baseados nos resultados propuseram um modelo numérico para previsão do comportamento completo de recalque de fundações superficiais em depósitos de solos cimentados.

Cudmani (1994) realizou ensaios de placa em fundações superficiais apoiadas em solos residuais parcialmente saturadas e simulou através do método dos elementos finitos o comportamento carga vs recalque e com isso foi possível obter os parâmetros de resistência (c' e ϕ') e o modulo de deformação do solo. Sales (1999) realizou estudos de prova de carga em camadas melhoradas com cimento com espessuras de 015 m, 0,30 m e 0,60 m apoiados em solos coesivos friccionais não homogêneos e comparou os resultados Meyerhof e Hanna (1978), Vesic (1975) e Purushothamaraj *et al.* (1974). Concluindo que o método de Meyerhof e Hanna (1978) foi o que melhor se adequou aos resultados experimentais. Quanto ao método de Vesic (1975) foi adequado até a relação $H_{\text{cam}}/D_{\text{pl}} \leq 1$, pois para a relação $H_{\text{cam}}/D_{\text{pl}}$ superior 1 havia presença de tensões elevadas de ruptura incompatíveis com o ensaio de placa e por fim resultados indesejados pelo método de Purushothamaraj *et al.* (1974).

Thomé (1999) verificou a influência da relação H_{cam}/D_{pl} na relação carga vs recalque e no mecanismo de ruptura através de ensaios de placa sobre sistemas de duplas camadas, sendo a primeira melhorada com cinza pesada, cal de carbureto e Arenito Botucatu. Como uma de suas conclusões determinou três relações de H_{cam}/D_{pl} , sendo H_{cam}/D_{pl} menor ou igual a 2 em situações de punção virtual. As curvas carga vs recalque apresentaram um pico bem definido de ruptura e ocorre a ruptura física da camada cimentada, sendo que as superfícies de ruptura estabelecem uma relação com a razão H_{cam}/D_{pl} . Estas superfícies são verticais quando a razão H_{cam}/D_{pl} é menor ou igual a 0,5 (ver a Figura 49) e inclinadas com um φ' aproximado de 22° quando esta relação se encontra na faixa entre 0,5 e 2,0, conforme apresentado na Figura 50.



Figura 49 – Superfícies de rupturas das camadas melhoradas: a) $H_{cam}/D_{pl} = 0,25$; b) $H_{cam}/D_{pl} = 0,50$. (Fonte: Thomé, 1999)

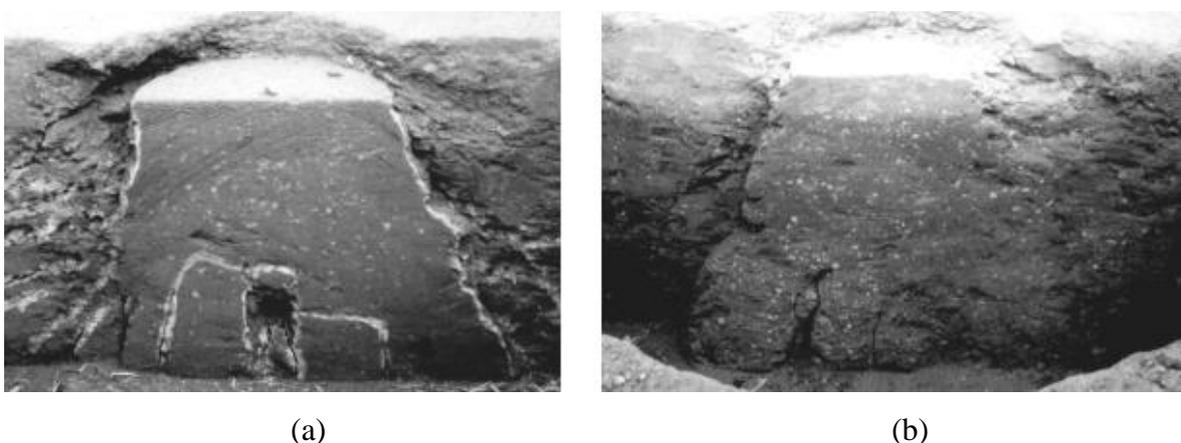


Figura 50 – Superfícies de rupturas das camadas melhoradas: a) $H/D = 1,00$; b) $H/D = 2,00$. (Fonte: Thomé, 1999)

Por fim, quando a relação H_{cam}/D_{pl} supera o valor de 3,5, a presença da camada cimentada não mais exerce influência na resposta carga vs recalque. O mesmo autor ainda salientou que estes intervalos são restritos a rupturas generalizadas ocorridas no material cimentado.

Casagrande (2001) estudou o comportamento carga vs recalque de fundações superficiais apoiadas em camadas compactadas (com e sem reforço de solo-fibra) em aterros experimentais por meio de ensaios de placa em placas circulares. Neste trabalho, foi identificado que houve um aumento significativo da capacidade resistente com a inclusão das fibras de polipropileno, além da redução considerável de recalques, quando comparado ao solo compactado.

Quanto ao mecanismo de ruptura, nas camadas cimentadas foi percebido que a formação das fissuras obedece a progressão e configuração demonstrada por Thomé (1999), porém o mesmo não foi constatado quando se trata de misturas solo-cimento-fibra pois as fibras distribuem as tensões e impedem a propagação de fissuras. Esse comportamento coaduna com as respostas obtidas em areia uniformidade por Festugato (2008), de forma que as fibras desenvolvem um comportamento de endurecimento (“*Strain Hardening*”) na mistura.

Marques *et al.* (2014) realizaram ensaios de placa em camada dupla com a camada superior cimentada artificialmente com diferentes diâmetros (B_{cam}) tendo como suporte um sistema em camadas tratado com diferentes espessuras (H_{cam}) considerando 5% de cimento Portland (determinado após análise de resultados de teste de compressão não confinada) e concluíram que parecem estar fortemente relacionados com a relação H_{cam}/B_{cam} , cujo o aumento da relação H_{cam}/B_{cam} interfere no comportamento da relação entre tensão aplicada e diâmetro (B_{cam}), tornando-se mais rígido e mais resistente.

Consoli *et al.* (2019) fizeram estudos de camadas melhoradas de areia de Osório/RS melhoradas com cimento CP V ARI RS com diferentes larguras (45 cm, 60 cm e 90 cm) e 30 cm de espessura apoiadas no solo laterítico de Passo Fundo/ RS. Os resultados provaram que para as camadas de 45 cm e 60 cm, as rupturas ocorreram entre a placa e a camada reforçada, já para as camadas acima de 90 cm o rompimento se deu após deformações elásticas excessivas, conforme ilustrado na Figura 51.

Neste trabalho, houve uma boa adequação das soluções de Hansen (1961) e Vésic (1975) em um único gráfico para previsão do comportamento de falha e a capacidade de suporte das camadas reforçadas sobre o solo avaliado. Giese (2019) comparou a resposta do solo laterítico argiloso de Passo Fundo/RS em estado natural com o mesmo solo compactado dinamicamente e com adição de uma camada melhorada com espessura de 220 mm, o que alterou não apenas a resistência última do solo, assim como a rigidez do sistema solo/camada melhorada ao se analisar o comportamento tensão vs deformação.

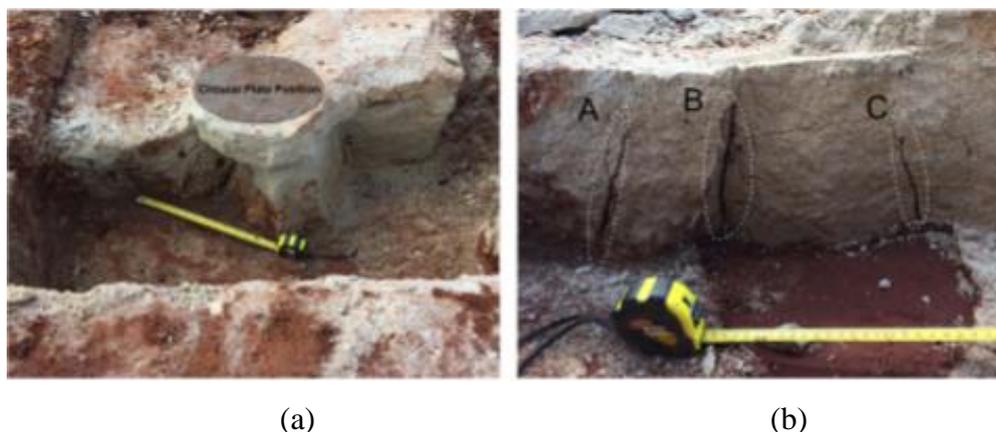


Figura 51 – a) visão geral após ensaio de carregamento; b) a visão lateral apresenta o mecanismo de ruptura na camada melhorada com dimensões 900 x 900 x 300 mm (Largura, Comprimento e espessura), cuja falha foi abaixo da placa de aço carregada verticalmente. (Fonte: Consoli *et al.*,2019)

2.10 MODOS DE FALHA DAS COLUNAS GRANULARES DE SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA

No que tange ao modo de falha, Madhav e Vitkar (1978) elencaram 3 modos de falhas que podem ocorrer em colunas granulares embutidas no solo ilustrada na Figura 52 . No caso da Figura 52a, ocorre a ruptura generalizada da coluna, similar ao mecanismo de Prandtl, ou seja, mesma forma de ruptura em fundações superficiais apoiadas em solos com elevadas rigidezes [i.e, argilas duras e areias compactas].

Quanto ao modo de falha referente ao abaulamento [i.e., expansão lateral da coluna granular] pode-se afirmar que ocorre em colunas granulares relativamente longas cuja sua pressão lateral supera a resistência ao empuxo lateral do solo circundante. Hughes e Withers (1974) realizaram estudos de colunas granulares com diâmetros entre 12,5 mm e 38mm e comprimento variados e concluiu que independentemente do comprimento da coluna, o padrão de deformação vertical e radial das colunas era basicamente o mesmo, e uma considerável distorção vertical e lateral que ocorria no topo da coluna diminuía rapidamente com a profundidade, conforme ilustrado Figura 52b.

Além disso, observaram que a carga máxima de uma coluna isolada carregada no topo era governada principalmente pela reação lateral máxima do solo ao redor da zona de abaulamento (zona expandida na direção radial) e que a extensão do movimento vertical dentro da coluna

era limitada. Hughes e Withers, (1974) relacionaram o mecanismo de falha com as dimensões geométricas das colunas granulares embutidas no solo, sendo que:

- Quando a relação L/Dt era inferior a 4, a coluna granular romperia antes de atingir o fenômeno de abaulamento;
- Constataram por meio de cálculos que a tensão vertical atinge o valor nulo em uma profundidade crítica ($4,1 Dt$ quando a coesão não drenada é constante em toda a profundidade do tratamento);
- À medida que o comprimento da coluna é reduzido, parte da tensão vertical aplicada será absorvida pelo solo através da base e as colunas atingirão a capacidade resistente final;
- Caso as colunas granulares sejam suficientemente curtas de forma que tensão na base da mesma exceda a capacidade de suporte do solo (cerca de 9 vezes a coesão não drenada), o modo de falha ocorrerá antes do abaulamento;
- Quando o comprimento da coluna é igual à falha crítica e o abaulamento da extremidade da profundidade, ocorre simultaneamente e além da profundidade crítica, as tensões na coluna são reduzidas à níveis inferiores da resistência final do solo coeso e a coluna rompe por abaulamento.

Quanto a ruptura por abaulamento, Barksdale e Bachus (1983) expuseram um uma relação de profundidade relativamente menor comparada a Hughes e Withers (1974), com relações na faixa entre $2Dt$ e $3Dt$ como mostrado na Figura 52b.

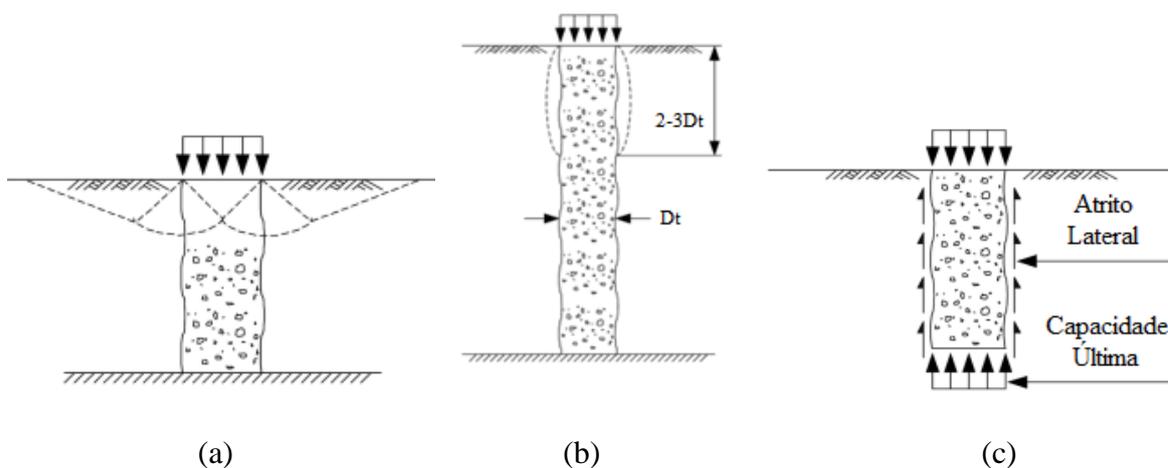


Figura 52 – Possíveis modos de falha de colunas granulares embutidas no solo submetidas a um carregamento vertical: a) ruptura generalizada no topo da coluna granular; b) ruptura por abaulamento; c) ruptura por deslocamento. (Fonte: Traduzido de Madhav e Vitkar, 1978)

Hamidi (2014) afirmou que a condição hipotética da Figura 52a (coluna granular em solo homogêneo) pode não ser a forma isolada de manifestação do abaulamento pois há situações que o solo local apresenta variação estratigráfica com presença de camadas específicas de solos muito coesos e com consistência mole e que por sua vez podem resultar em abaulamentos significativos nesta coluna em cotas mais superficiais ou profundas. Hughes e Withers (1974) perceberam que a resposta resistente da argila era significativamente afetada pelo carregamento com espaçamento de até $2,5 D_t$, sugerindo assim que para espaçamentos iguais ou superiores a $2,5 D_t$ as colunas granulares atuariam de forma isolada.

De acordo Madhav e Vitkar (1978), o terceiro modo de falha se deve ao puncionamento (ver a Figura 52c) da coluna granular que consiste em uma forma de ruptura rígida comum a estacas de concreto e aço. Esta forma de ruptura julga-se inapropriada ao contexto devido a negligenciar possíveis deslocamentos horizontais que naturalmente ocorre durante a aplicação do carregamento vertical no topo da coluna granular.

Quando se analisa em termos de efeito em grupo, o solo mole provavelmente rompe por modos falha combinados de abaulamento e ruptura localizada, conforme Figura 53. A ruptura localizada é caracterizada pelo trincamento concentrado do solo circundante da coluna rígida (individual ou em grupo). Em caso de presença de grupos de colunas de areia com comprimentos curtos da coluna pode ocorrer ruptura generaliza ou talvez ocorra perda de capacidade de suporte de colunas individuais semelhantes ao modo de falha de colunas areia curtas. (HARISH *et al.*, 2016)

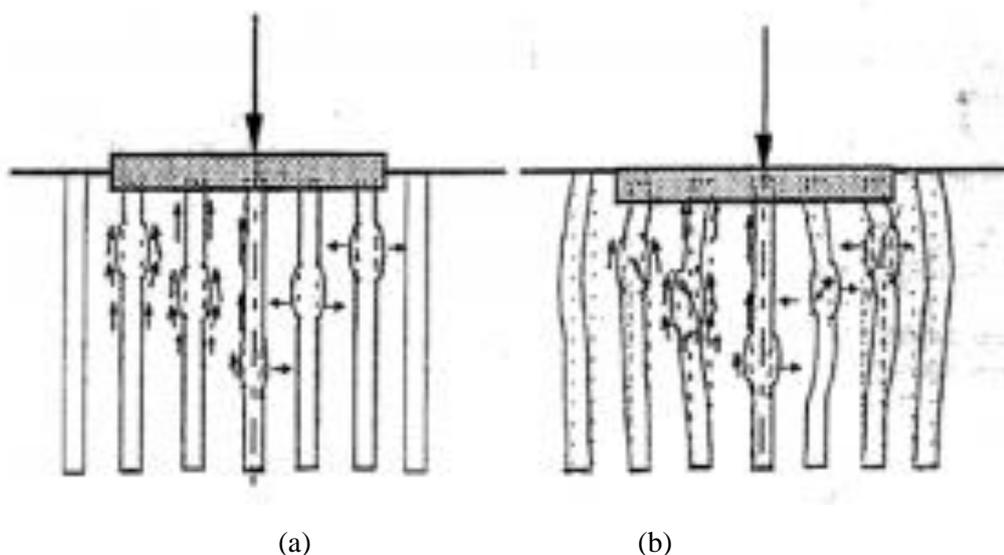


Figura 53 – Modos de falha de coluna granular em grupo: a) Antes de romper; b) Após romper. (Fonte: Harish *et al.*, 2016)

2.11 EQUAÇÕES TEÓRICAS

Como alternativa de avaliação do comportamento de camadas melhoradas, Consoli *et al.* (2019) levantaram como possibilidades as soluções de Hansen (1961) e Vesic (1975). Hansen (1961) generalizou a equação de capacidade de carga de Terzaghi (1943) introduzindo os fatores “d” e “i”, conforme equação (38):

$$\frac{Q_u}{A} = c' \cdot N_c \cdot S_c \cdot d_c \cdot i_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q \cdot S_q \cdot d_q \cdot i_q + \frac{B_f}{2} \cdot \gamma \cdot D_f \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \quad (38)$$

Considerando o carregamento centrado da fundação, ruptura por puncionamento, ou seja, parâmetros c' igual a $2/3c$ e $\text{tg}\phi' = 2/3\text{tg}\phi'$ para estimar os fatores de capacidade de carga mencionados equações 39, 40 e 41 considerando os fatores de forma da Tabela 9 e desconsiderando os fatores de profundidade em função do procedimento comum de escavação, execução de fundação e reaterro, obtém-se a formulação de capacidade de carga mencionada na equação (42):

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \text{tg} \phi' \quad (39)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cotg \phi' \quad (40)$$

$$N_q = e^{\pi \text{tg}\phi'} \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (41)$$

Tabela 9 – Fatores de forma (Fonte: Hansen, 1961)

Fatores de Forma	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1	1	1
Retangular	$1 + (B'/L') (N_q/N_c)$	$1 + (B'/L') \text{tg}\phi'$	$1 - 0,4B (B'/L')$
Circular	$1 + (N_q/N_c)$	$1 + \text{tg}\phi$	0,6

Legenda: B': base efetiva; L': Largura efetiva.

$$\frac{Q_u}{A} = c' \cdot N_c \cdot S_c + \gamma \cdot D \cdot N_q \cdot S_q + \frac{B_r}{2} \cdot \gamma \cdot D_f \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad (42)$$

Sales (1999) citou em que em 1970, Vésic estudou o comportamento de fundações superficiais em solos estratificados, onde a partir de análises experimentais, equacionou o problema em para situações de sapatas apoiadas no topo do solo mais resistente (c'_1 e ϕ_1) sobreposto a camadas de menores resistência (c'_2 e ϕ_2) apresentando assim rupturas típicas de

puncionamento da camada superior. Considerando o estrato superior rígido como uma camada melhorada sobre o estrato inferior (solo pouco resistente) tem-se a Figura 54.

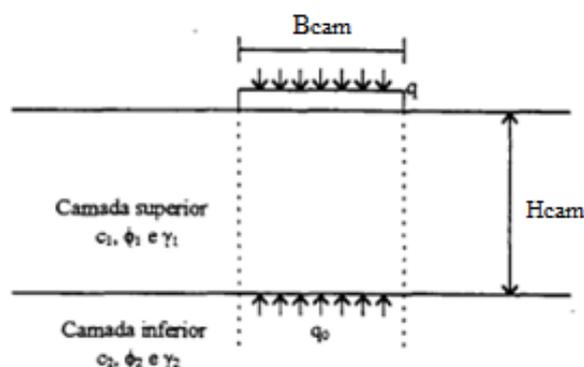


Figura 54 – Puncionamento da camada superior. (Fonte: adaptado de Vesic, 1975)

Vesic (1975) apresentou um estudo sobre capacidade de suporte de fundações superficiais, onde relatou o comportamento carga vs recalque, modelos de ruptura, critérios para determinação da carga última, fatores que influenciam o comportamento das sapatas durante o carregamento, etc. Com isso desenvolveu a fórmula de capacidade de carga da equação (43):

$$\frac{Q_u}{A} = \left[q_0 + \left(\frac{1}{K_s} \right) c'_1 \cot \varphi'_1 \right] e^{2 \cdot \left[1 + \frac{B_{cam}}{L} \right] \tan \varphi'_1 \left(\frac{H_{cam}}{B_{cam}} \right)} - \left(\frac{1}{K_s} \right) c'_1 \cot \varphi'_1 \quad (43)$$

Onde, constante \$K_s\$ é calculada pela equação (44):

$$K_s = \left(\frac{1 - \sin^2 \varphi'_1}{1 + \sin^2 \varphi'_1} \right) \quad (44)$$

Neste caso, deve-se utilizar uma equação geral de capacidade de suporte para solos homogêneos com parâmetros da camada inferior. Para casos de sapatas quadradas ou circulares (Diâmetro=Largura) apoiadas na camada melhorada infinita, têm-se a equação (45):

$$\frac{Q_u}{A} = \left[q_0 + \left(\frac{1}{K_s} \right) c'_1 \cot \varphi'_1 \right] e^{4 \tan \varphi'_1 \left(\frac{H_{cam}}{B_{cam}} \right)} - \left(\frac{1}{K_s} \right) c'_1 \cot \varphi'_1 \quad (45)$$

Meyerhof e Hanna (1978) avaliaram diferentes modelos de rupturas comparando respostas de ensaios de carregamento de sapatas circulares e corridas em solos apoiados em um perfil de solo composto por duas camadas, cuja camada superior encontrava-se compacta ou rígida e a camada inferior em estado fofo ou mole.

Madhav e Vitkar (1978) desenvolveram uma solução para a capacidade de suporte final da base de uma coluna granular (deformação plana) fundamentada no mecanismo geral de falha de cisalhamento usando o teorema do limite superior com base em considerações cinemáticas (ver a Figura 55).

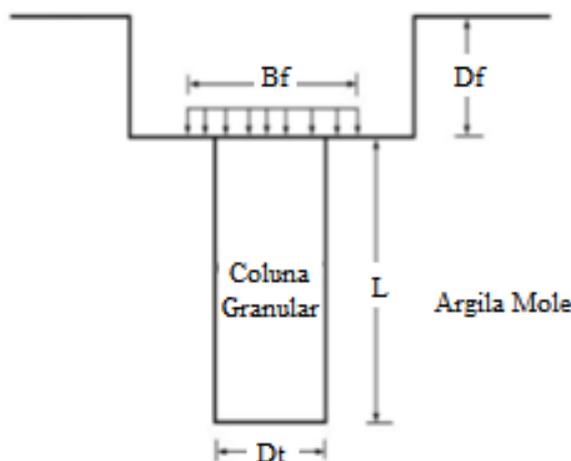


Figura 55 – Modelo analítico de capacidade de carga de colunas granulares geradas por substituição dinâmica. (Fonte: Madhav e Viktar, 1978)

As expressões para energia interna basearam-se no estudo de Chen (1969), devido à coesão mobilizada ao longo de vários limites das superfícies de falha e ao trabalho realizado pelo peso do solo, sobrecarga e carga externa, sendo q_{ult} descrito pela equação (46) com base nas equações (47) e (48):

$$q_{ult} = C_s N_c + \frac{1}{2} B_f N_\gamma + D_f \gamma_s N_q \quad (46)$$

Sendo:

$$N_c = \frac{C_t}{C_s} N_{ct} + N_{cs} \quad (47)$$

$$N_\gamma = \frac{\gamma_t}{\gamma_s} N_{\gamma t} + N_{\gamma s} \quad (48)$$

Madhav e Vitkar (1978) desenvolveram ábacos relacionando os fatores de capacidade carga N_c , N_q e N_γ em função da razão D_{cam}/B_{cam} , conforme Figura 56. Estes ábacos apresentam as seguintes restrições de utilização: valores de D_{cam}/B_{cam} entre 0 e 2; ϕ_s entre 20° e 50°; ϕ_t igual a 0; valores de C_t/C_s entre 0 e 1; e valores de γ_t/γ_s igual a 1, como pode ser visto na Figura 56.

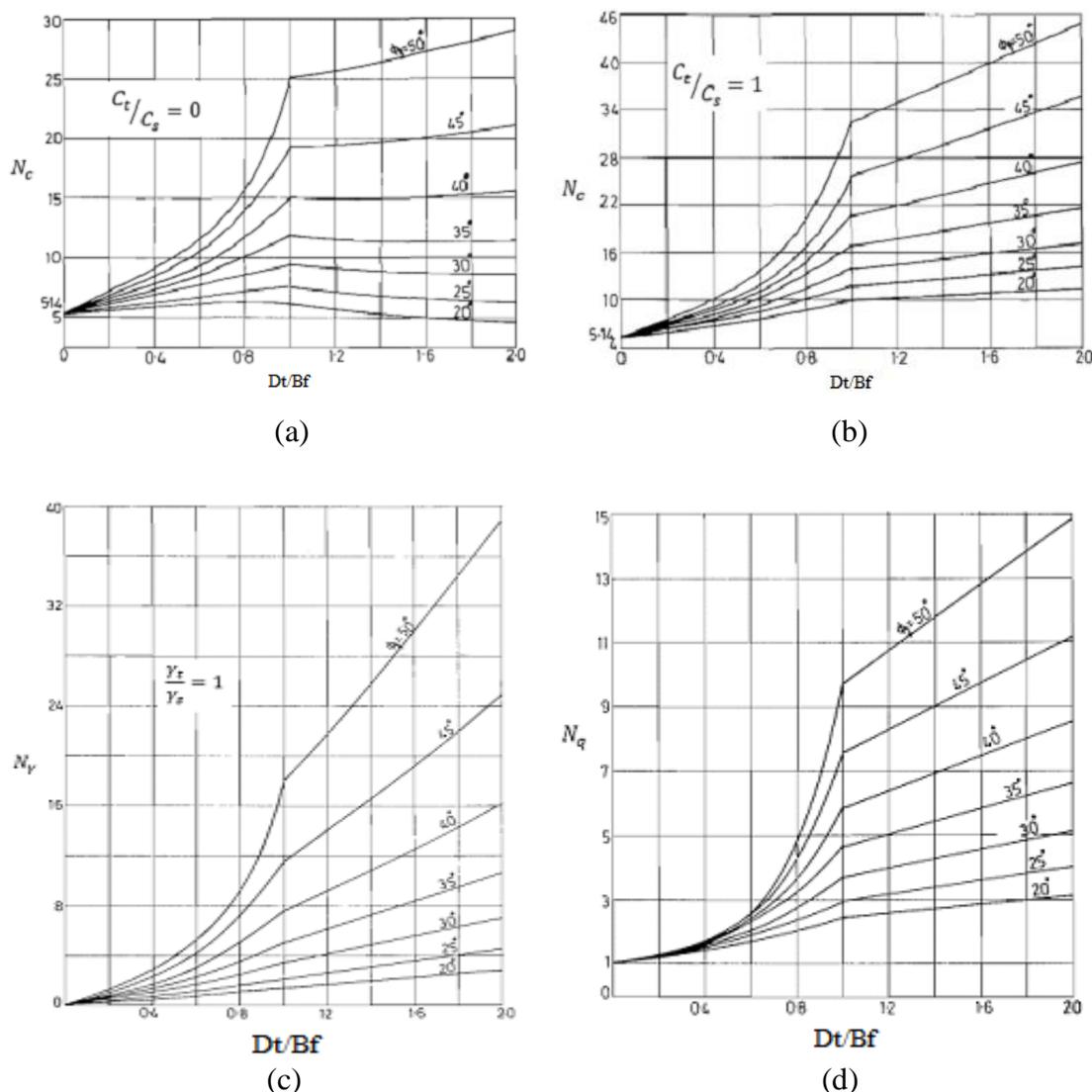


Figura 56 – Fator de capacidade de carga de colunas granulares para variadas faixas de ângulo de atrito do solo: a) N_c vs D_{cam}/B_{cam} ($C_t/C_s = 0$); b) N_c vs D_t/B_f ($C_t/C_s = 1$); c) N_γ vs D_t/B_f para casos de $\gamma_t/\gamma_s = 1$; d) N_q vs D_t/B_f . (Fonte: Madhav e Vitkar, 1978)

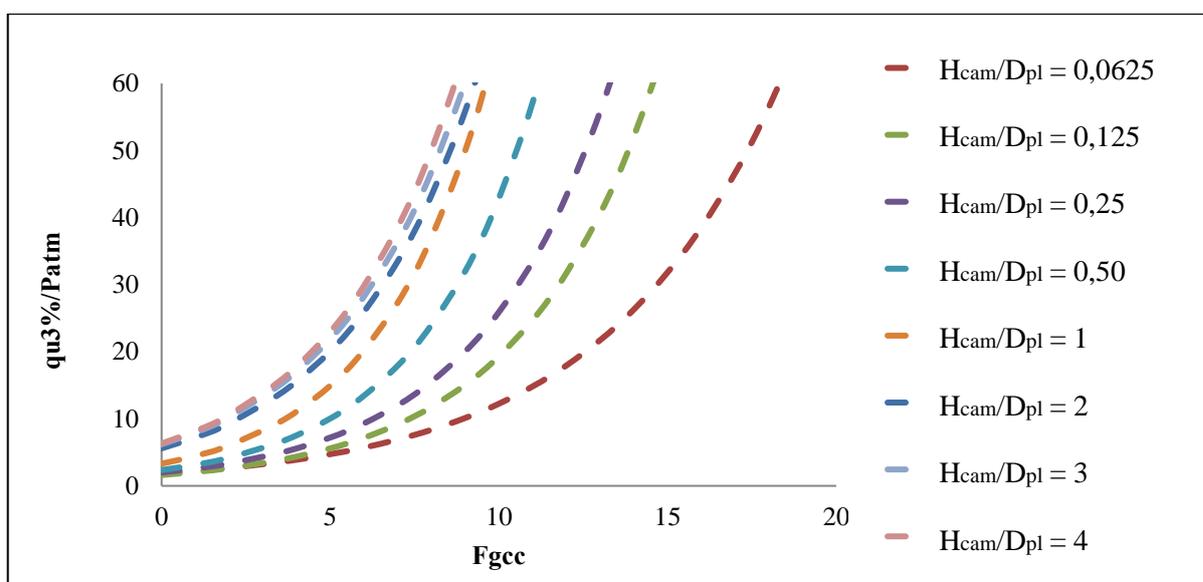
Thomé (1999) propôs um método semiempírico para obtenção da capacidade de carga a 2% do recalque relativo em função de resultados numéricos ajustados matematicamente a partir da relação $q_{u2\%}/P_{atm}$ vs F_{gcc} . Em sua pesquisa, ele verificou que a capacidade de carga é variável em função de H_{cam}/D_{pl} , da coesão do solo cimentado e dos parâmetros do solo não-cimentado, utilizando o artifício da associação de fatores F_1 e F_2 que compõe o fator F_{gcc} . Além disso, os parâmetros envolvidos na equação (49) estão validados em função da faixa de valores citada na Tabela 10.

$$F_{gcc} = \ln \left(\frac{C'_1}{p_a} \right) + \ln \left(\frac{C'_2}{p_a} \right) + \frac{1}{\cos^4 \phi_{2l}} + \ln \left(\frac{E_{m2}}{p_{atm}} \right) \quad (49)$$

Tabela 10 – Faixa de valores de parâmetros que podem ser adotados. (Fonte: Thomé, 1999)

Materiais cimentados	Materiais não cimentados
$0,19 \leq c'1/P_{atm} \leq 4,44$	$0,01 \leq c'2/P_{atm} \leq 0,50$
$0,70 \leq tg\phi'1 \leq 1,19$	$0,26 \leq tg\phi'2 \leq 0,70$
$2961 \leq E1/P_{atm} \leq 14810$	$98 \leq Em2/P_{atm} \leq 988$

Faro e Consoli (2014) com base no estudo de Thomé (1999) desenvolveram curvas de $q_{u3\%}/Pa$ vs F_{gcc} através de simulações numérica com base no método dos elementos finitos acoplados com modelo elástico perfeitamente plástico e critério de ruptura *de Drucker Pragger* e lei de fluxo não associado várias relações de H_{cam}/D_{pl} que variavam de 0,0625 a 4,0, conforme Figura 57.

**Figura 57** – Ábaco para obtenção da carga de ruptura de fundações apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a camada superior foi artificialmente cimentada, para recalques relativos de 3%. (Fonte: Modificado de Faro e Consoli, 2014)

Foppa (2016) desenvolveu uma equação de dimensionamento de camada melhorada em função da distribuição das tensões de tração obtidas nas análises numéricas, onde foi percebido que o comportamento de uma camada de reforço pode ser comparado com a de uma viga bi-apoiada ou um bloco de fundação, dependendo da sua espessura como pode ser visto na Figura 58. O modelo estático de viga se adequa ao contexto pelas concentrações de tensões desenvolvidas nas bordas da placa que iniciam as plastificações nesse ponto imediatamente abaixo da placa.

Portanto nota-se que na ruptura do sistema, a tensão que atua na base do reforço será $Q_{ur}(n)$ em função de aplicação de conceitos de tensões de resistência dos materiais, obtendo assim a equação (50). De forma que para impossibilitar a ruptura no reforço a tensão máxima de tração deverá ser menor que a resistência à tração do reforço q_t dividida por um FS, conforme equação (51).

$$\sigma_{t_{m\acute{a}x}} = 3 Q_{ur}(n) \left(\frac{Tr^2}{Hcam^2} \right) \quad (50)$$

$$\sigma_{t_{m\acute{a}x}} = 3 Q_{ur}(n) \left(\frac{Tr^2}{Hcam^2} \right) \leq \frac{q_t}{FS} \quad (51)$$



Figura 58 – Analogia dos esforços da camada melhorada em função do modelo isostático de viga biapoiada. (Fonte: Foppa, 2016)

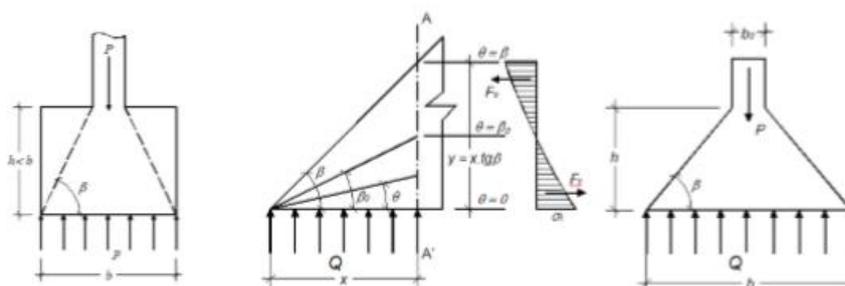


Figura 59 – Modelo de tensões em bloco de seção plena (camada melhorada espessa). (Fonte: Foppa, 2016)

Havendo situações de reforços com maiores espessuras (ver a Figura 59), Foppa (2016) concluiu que o comportamento da camada melhorada tende a se aproximar de um bloco de fundação, onde as tensões de tração máxima ocorrem no eixo da peça. Desta forma, para reforços mais espessos, o valor da tensão de tração máxima na base de reforço será igual a

equação (52). Em caráter complementar, Foppa (2016) sugere a introdução de um fator de segurança no dimensionamento da camada, como pode ser visto na equação (53).

$$\sigma_t, \text{máx} = \frac{Qru(n)}{\frac{\tan \beta}{\beta} - 1} \quad (52)$$

$$\sigma_t, \text{máx} = \frac{Qru(n)}{\frac{\tan \beta}{\beta} - 1} \leq \frac{qt}{FS} \quad (53)$$

2.12 EQUIPAMENTO INCLINÔMETRO – CONCEITOS, ASPECTOS HISTÓRICOS, INSTALAÇÃO, TIPOS E INTERPRETAÇÃO

Penz (2013, p.32) citou que o inclinômetro consiste em:

“... todo instrumento que devido as suas características construtivas propicia efetuar a medição de inclinação local ou apenas verificar a existência de uma variação angular, podendo realizar seu processo de forma diferencial ou absoluta.”

Há uma gama de trabalhos na literatura geotécnica que abordam os mais variados aspectos sobre este equipamento [e.g., Dunicliff (1988); Green e Mikkelsen (1988); Formoso (1999); Mikkelsen (2002); Mikkelsen (2003); Silveira (2006); Stark e Choi (2008); Fernandes (2011); Penz (2013)]. Segundo Dunicliff (1988), os inclinômetros podem ser encontrados com as denominações de *slope inclinometer*, *probe inclinometer*, *slope indicator*, *clinometer*, *tiltmeter*, entre outros.

Embora a sonda inclinométrica seja consagrada pelo meio geotécnico, Eberhardt e Stead (2011) citaram que ocorre a alternativa de instrumentação por inclinômetro fixo podendo ser usado para monitorar movimentos contínuos das superfícies de cisalhamento ativas. Os inclinômetros fixos (*In Place Inclinometer*) consistem em um (ou vários) sensores de inclinômetro alojados dentro de um corpo metálico, que são separados através de estruturas em aço inoxidável, hastes e conjuntos de rodas e instalados em zonas de deslocamento esperados permitindo monitoramento automático remoto de movimentos de inclinação.

Atualmente, além do inclinômetro *In Place* tradicional, outras empresas como *Measurand®*, tem se posicionado no mercado do monitoramento geotécnico a partir de instrumentações de barragens, aterros, taludes e escavações com a difusão do inclinômetro *In-Place SAA*. Este equipamento representa uma matriz de segmentos rígidos separados por juntas que se movem livremente em qualquer direção sem torção, cujas medidas de inclinação são

registradas tridimensionalmente por meio de sensores *MEMS*. Contudo, nas mineradoras brasileiras este equipamento encontra-se em fase de testes.

Silveira (2006) explicou que os inclinômetros são empregados em avaliações de uma gama de obras e intervenções geotécnicas, tais como: estabilidade de taludes em barragens, obras rodoviárias, escavações a céu aberto, obras de mineração etc. Em linhas gerais, o equipamento inclinômetro é provido de uma sonda (ou torpedo) à prova d'água dotado de um pêndulo interno, o qual é inserido em tubo guia vertical, cujos deslocamentos angulares em determinados intervalos, produzidos pela movimentação da massa do solo, são percebidos pelo instrumento através da sua passagem e registrados por um sistema de aquisição de dados.

Dunicliff (1988) e Stark e Choi (2008) citaram que os aparelhos inclinômetros são usados para determinar a magnitude, taxa, direção, profundidade e tipo de movimento de deslizamento de terra. Essas informações geralmente são de vital importância para entender a causa, o comportamento e a correção de um deslizamento de terra, embora estes objetivos não sejam atingidos em função da ausência de monitoramento contínuo. Hunt (2005) citou que as medições das deflexões laterais são realizadas continuamente a partir da superfície com o inclinômetro, sendo os mesmos bastante úteis em monitoramento de taludes e estacas de fundação.

Neste tópico são informados aspectos históricos a respeito do acelerômetro, elementos componentes do inclinômetro, procedimentos de leitura e aquisição de dados, tipos de inclinômetros comerciais e apresentação de inclinômetros experimentais outrora desenvolvidos.

2.12.1 Aspectos históricos dos inclinômetros

O inclinômetro, comumente usado hoje no ramo geotécnico, foi desenvolvido com base em um dispositivo construído em 1952 por S. D. Wilson, da Universidade de Harvard, sendo apenas disponível comercialmente no final da década de 1950 pela *Slope Indicator Company*. (GREEN e MIKKELSEN, 1988) Um tipo de inclinômetro que foi muito bem-sucedido foi o desenvolvido por Wilson (1962)²⁵ foi o tipo *Ponte de Wheatstone*, cujo funcionamento baseava-se em respostas de movimento pendular em contato com uma bobina de resistência de enrolamento de precisão especial que se dividia em duas resistências que compunham metade

²⁵WILSON, S. D.. The use of slope measuring devices to determine movements in earth masses. In: Symposium on field testing of soils. ASTM, STP 332, 1962, p.187-198.

do circuito da ponte, sendo a outra metade da ponte contida em uma caixa de controle. As leituras eram realizadas em função do equilíbrio potenciométrico das inclinações da sonda (HANNA, 1985).

Wilson²⁶ (1974 *apud* SILVEIRA, 2006; MARR, 2003) citaram que a Barragem e Hidrelétrica de *Mammoth Pool* foi a primeira grande obra de terra e enrocamento a incorporar instrumentação para medir deformações horizontais internas durante a construção entre os anos 1958 e 1959 em Fresno, nos Estados Unidos.

Machan e Benett (2008) informaram que o equipamento inclinômetro com uso de servo-acelerômetros foi introduzido na indústria em 1969, sendo este tipo de inclinômetro usado comumente, cuja sonda de deslocamento é inserida na profundidade total da carcaça (tubo-guia) e usada para registro da inclinação da caixa em intervalos pré-determinados para descrever o perfil do solo.

Silveira (2006) citou que com o passar dos anos, o instrumento foi sendo aperfeiçoado de modo que as leituras se tornassem mais precisas. Em 1970, a *Slope Indicator Company* desenvolveu um inclinômetro da série 200B que apresentava um pêndulo cujo deslocamento era medido através de resistência elétrica com sensibilidade 1:1000 [i.e., deslocamento angular de 1mm/m] e que ainda foi utilizado na instrumentação das barragens brasileiras de Ilha Solteira e Água Vermelha.

Cárdia²⁷(1990 *apud* SILVEIRA, 2006) apresentou a relação de algumas obras da CESP, entre os anos de 1965 e 1985, que apresentaram a utilização de inclinômetros com servo-acelerômetros sendo aplicados no Canal de Pereira Barreto - SP, em 1980, e para a instrumentação da barragem de Três Irmãos - SP, em 1981.

Mikkelsen (2003) informou que as principais inovações que ocorreram nos últimos 20 anos se balizam na leitura e gravação de dados com auxílio de *softwares* comerciais e equipamentos para gestão e cálculo os dados para interpretação das informações de entrada. Através das leituras gravadas, as investigações são agilizadas, assim como erros de leituras e erros de transposição manual são minimizados.

Com o advento do século XXI, houve o desenvolvimento tecnológico destes equipamentos fundamentado na introdução dos acelerômetros *MEMS* e transferência de dados através de

²⁶WILSON, S. D.. Deformation of earth and rockfill dams. In: Embankment Dam Engineering-Casagrande Volume, New York: John Wiley & Sons,1973, p.365-417.

²⁷CÁRDIA, R. J. R.. Deficiências de inclinômetros e metodologia de instalação. **Simpósio sobre instrumentação geotécnica de campo**. s/Vol, s/nº, 1990, s/pp.

comunicação sem fio [i.e., *Bluetooth*® e *Wifi*®]. Com isso, fabricantes como *Slope indicator Co*®, *Geokon*®, *Geodaq*® e *Encardiorite*® desenvolveram sondas mais versáteis, eficientes e precisas.

2.12.2 Tipos e elementos componentes do inclinômetro

Dunicliff (1988) explicou que o sistema inclinométrico é composto por quatro componentes, sendo eles:

- a) um tubo guia de instalação permanentemente que pode ser feito de plástico, liga de alumínio, fibra de vidro ou aço. No caso de realização de medições horizontais de deformação, o tubo é instalado aproximadamente vertical, além disso o tubo guia possui ranhuras marcadas em direções perpendiculares para controlar a orientação da sonda;
- b) uma sonda portátil contendo um transdutor sensível à gravidade;
- c) unidade de leitura portátil com fornecimento de energia e indicação da inclinação da sonda;
- d) por fim, um cabo elétrico graduado que liga a sonda à unidade de leitura.

Krelling (2006) citou que os inclinômetros podem se basear em vários princípios de funcionamento, tais como: pêndulos, (que referenciam a variação angular à vertical do local), esferas, líquidos (níveis tubulares com substâncias eletrolíticas, que permitem a avaliação da inclinação baseando-se na medição da voltagem de saída do sistema), medição angular direta, entre outros. Além disso, podem ser uni ou bidirecionais e com precisões variáveis atingindo valores próximos a 0,001°.

Silveira (2006) citou que a maioria dos inclinômetros são concebidos com servo-acelerômetros como transdutores de deslocamentos, ainda assim existem inclinômetros que são produzidos com corda vibrante. Os inclinômetros de corda vibrante foram desenvolvidos para trabalharem solidários às estruturas de concreto e medirem deslocamentos provocados por escavações subterrâneas. Na Tabela 11 estão elencados alguns tipos de inclinômetros comerciais desenvolvidos com servo-acelerômetros pelos principais fabricantes.

Silveira (2006) afirmou que em função do desalinhamento dos tubos-guia, a empresa *Slope Indicator Co*® começou a desenvolver equipamentos que permitiam medir essas variações de alinhamentos entre tubos consecutivos ao longo de todo o tubo, e com uso de *softwares*, os deslocamentos horizontais acumulados eram corrigidos. O equipamento desenvolvido foi o

Spiral Sensor ou *Model 6005 Spiral Indicator*, sendo ele recomendado para: situações de furos profundos; movimentos direcionados a posições improváveis; excesso de precisão na medição dos deslocamentos; e por fim, em casos que ajam dificuldades quanto a instalação do tubo guia.

Tabela 11 – Relação de modelos de inclinômetros com servo-acelerômetros desenvolvidos por vários fabricantes. (Fonte: Silveira, 2006)

Fabricante	Modelo	Sensor	Dimensões da tubulação			Leitura (°)	Sensibilidade	
			Øext (mm)	Øint (mm)	Øluva (mm)		seg	mm/m
<i>Geokon</i>	6000	Servo-acelerômetro	70	58	---	± 53°	± 10'	± 0,05
			75	61	---			
<i>SisGeo</i>	OS241SH1500	Servo-acelerômetro	64	54	---	± 15°	± 5'	± 0,02
			85	75	89			
			---	70	---			
<i>Soil Instrument</i>	C10	Servo-acelerômetro	70	60	---	± 30°	± 10'	± 0,05
<i>Slope indicator</i>	<i>Digitilt</i>	Servo-acelerômetro	85	75	89	± 53°	± 36'	± 0,17
			70	60	73			
<i>Roctest</i>	<i>Accutilt RT-20</i>	Servo-acelerômetro	85	73	90	± 90°	± 20'	± 0,2
			70	59	73			
<i>RST instruments</i>	<i>Probe inclinometer</i>	Servo-acelerômetro	85	73	90	± 30°	± 20'	± 0,09
			70	59	73			

Atualmente os sistemas dos inclinômetros possuem um sistema de aquisição que podem ser transferidos a um equipamento pessoal [i.e., *tablets, notebooks, smartphones*] cujas leituras realizadas pelo instrumento são enviadas e convertidas em gráficos que ilustram o comportamento do maciço. A Tabela 12 apresenta alguns inclinômetros desenvolvidos recentemente com as suas especificações, tanto com servo-acelerômetros quanto com inclinômetros *MEMS*.

Ao longo do tempo, o fabricante *Slope Indicator Co*® desenvolveu o sistema inclinômetro *Digitilt Classic*® (ver a Figura 60a) que é composto por uma sonda *Digitilt*®, cabo de controle para serviços pesados, a unidade leitura do *DataMate II*® e o *SoftwareDigiPro2*®. Neste modelo, o inclinômetro é controlado pelo *DataMate*, onde a gravação é acionada por um operador através de um interruptor. Com isso, o *DataMate* confirma com um sinal sonoro e apresenta a próxima profundidade. O operador reposiciona a sonda, observa o sinal de confirmação e registra a leitura, repetindo essas derivações até que a investigação seja concluída. (SLOPE INDICATOR, 2019)

Tabela 12 – Relação dos inclinômetros mais desenvolvidos. (Fonte: Silveira, 2006)

Fabricante	Modelo	Acelerômetro	Dimensões do equipamento		Leitura a (°)	Precisão	Resolução
			Ø (mm)	Ls (mm)			
Slope indicator	Digitilt Classic	Servo- acelerômetro	---	---	± 30°	±6mm/25m	0,01mm/500mm
	Digitilt AT	MEMS	---	---	± 30°	---	0,005mm/500m m
Geokon	GK-604D	MEMS	$\frac{25}{25}$	$\frac{700}{1200}$	± 30°	±3mm/30m	0,025mm/500m m
Encardiorit e	EAN- 26M	MEMS	25,5	685	± 30°	±4mm/30m	0,008mm/500m m

Uma vez com as leituras realizadas, o operador poderá exibir estatisticamente a soma de verificação para validar a investigação. De posse dos dados, o operador transfere as informações do *DataMate* para o PC usando o *software DigiPro2* e assim processar e plotar os dados.

O fabricante *Slope Indicator Co*® desenvolveu também o sistema *Digitilt AT*® (ver a Figura 60b) que é constituído por uma sonda digital, cabo de controle, um porta-cabo, *Bluetooth*® e o aplicativo *Digitilt Reader*® para dispositivos baseados na tecnologia *Android*® e o *software* inclinômetro *DigiPro2*. (SLOPE INDICATOR, 2019)



Figura 60 – Ilustração de inclinômetros comerciais: a) *Digitilt Classic*®; b) *Digitilt AT*®. (Fonte: Slope Indicator, 2019)

Este inclinômetro é operado através de um acionamento pelo *Reader* ou através de *QR code*. A medida em que o cabo é puxado em cada profundidade, os dados são armazenados em uma memória e depois a investigação passa pela etapa de validação. Após isso, os dados são enviados via *internet*, usando *e-mail* com anexos automáticos ou *Dropbox*® (nuvem eletrônica)

para sincronização completa. Caso a *internet* esteja indisponível é possível transferir os dados através de um cabo USB. (SLOPE INDICATOR, 2019)

Além deste, Geokon (2019) apresentou um sistema inclinômetro com uso de acelerômetro *MEMS* denominado *GK-604D* (ver a Figura 61a) constituído por uma sonda inclinométrica digital Modelo *6100D*, um cabo montado em bobina e um *Field PC*. No modelo *6100D* contém componentes eletrônicos para converter a tensão analógica em um sinal digital, que é transmitido pelo cabo de controle para o carretel de cabo que contém uma interface que se comunica sem fio com o *PC* de Campo (Modelo *FPC-2*).

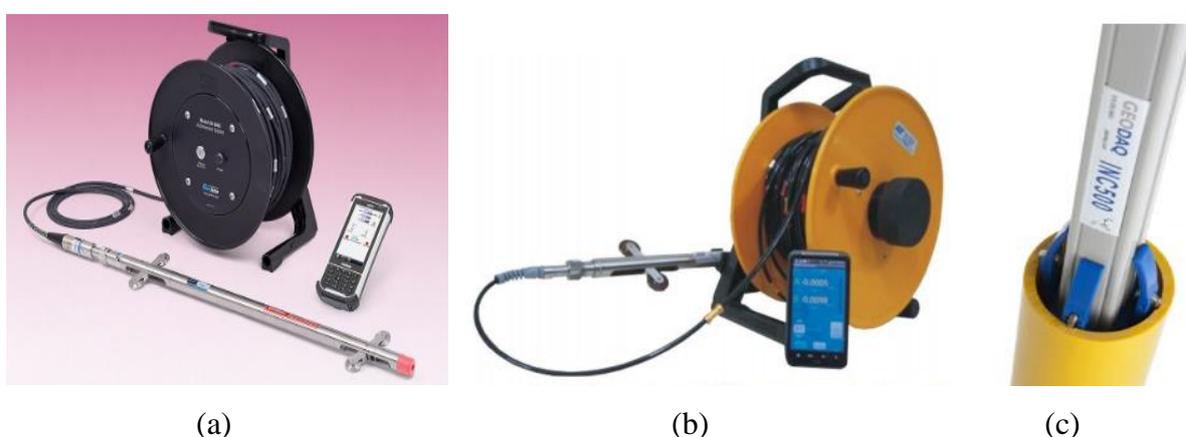


Figura 61 – Ilustração de outros inclinômetros comerciais: a) *GK-604D* (Fonte: Geokon, 2019); b) *EAN-26M* (Fonte: Encardiorite,2016); c) *i6 INC 500*. (Fonte: Geodaq, 2014)

Encardiorite (2016) apresentou o equipamento no modelo *EAN-26M* (ver a Figura 61b) que consiste em um sensor de inclinação digital conectado a uma unidade de carretel de cabo que fica na parte exterior do furo. O carretel é composto por uma bobina com o cabo, uma bateria recarregável e um dispositivo de *Bluetooth*® que se comunica via *wireless* (sem fio) com o dispositivo *smartphone* com tecnologia *Android*® baseado em transmissão *GSM/GPRS*.

Geodaq (2014) comercializou o inclinômetro *i6 INC 500*® (ver a Figura 61c) que é uma sonda constituída por acelerômetro *MEMS* com resolução de $0,001^\circ$ e sistema de monitoramento capaz de medir a vertical ou horizontal. Além disso, possui um centralizador patenteado que permite a instalação da sonda inclinométrica tamanho padrão com posicionamento estabilizado em todas as direções através de quatro conjuntos de rodas de aço inoxidável. Em relação ao envio de dados, a transferência é feita por comunicação sem fio, sendo o monitoramento realizado em tempo real, fornecendo projeções de deslocamento para qualquer navegador da *web*.

2.12.2.1 Tipos de acelerômetros

Teves (2013, p. 20) conceituou o acelerômetro como:

“... um dispositivo eletromecânico capaz de medir aceleração, isto é, taxa de variação de velocidade. Estas acelerações podem ser estáticas, como força da gravidade, ou dinâmicas, causadas por movimentação ou vibração.”

Os acelerômetros são normalmente especificados por sua: sensibilidade, faixa máxima de operação, resposta em frequência, resolução, não-linearidade em escala total, *offset*, sensibilidade fora do eixo e sobrevida por choque. Os acelerômetros micro usinados são usados em uma ampla gama de aplicações [e.g., desde medições de microgravidade até sensores de balística] cujas especificações exigidas também são dependentes da aplicação e dão cobertura a um amplo espectro. (YAZDI *et al.*, 1998)

Machan e Bennett (2008) citaram que os dois tipos de acelerômetros estão sendo utilizados em sondas inclinométricas disponíveis nos Estados Unidos: o servo-acelerômetro ou o acelerômetro *MEMS*. Exemplo de uso de servo-acelerômetros em inclinômetros é mencionado em Hunt (2005) com possibilidade de detectar deflexões laterais na faixa de $\pm 0,03048\text{mm}$ por $0,6096\text{m}$ (parcelas de tomadas de leitura).

Ripper Neto (2007) explicou que os servo-acelerômetros são sensores de grande precisão, linearidade, além de gerarem respostas estáticas e de baixa frequência, porém possuem limitações de serem caros e apresentarem uma faixa dinâmica de amplitude limitada. O princípio de funcionamento baseia-se na detecção de uma massa por sensor capacitivo de alta sensibilidade em relação à carcaça do acelerômetro, portanto uma vez que a carcaça se sujeite a uma determinada aceleração, a massa desloca-se da sua posição neutra.

Este deslocamento gera interferência no sensor capacitivo diferencial, que por sua vez reage produzindo um sinal de corrente contínua proporcional ao deslocamento produzido. E assim, este sinal é amplificado para alimentação das bobinas dos eletroímãs e conseqüentemente produz um campo magnético permanente, mas como as bobinas estão dentro deste campo, uma força eletromagnética proporcional à corrente é aplicada à massa para retornar a sua posição.

Em termos de servo-acelerômetros, Machan e Benett (2008) expuseram que os elementos sensores de balanceamento de força detectam a mudança na inclinação (da vertical absoluta) da sonda que abriga os sensores. Sondas assim contêm servo-acelerômetros biaxiais e são

equipadas com dois conjuntos de rodas de pressão por mola para guiar a sonda ao longo das ranhuras longitudinais da caixa de guia. Possuem uma precisão máxima de 1:24.000, mas está normalmente mais próxima de 1:4.000 sem correções de erros sistemáticos. A resolução é quase linear e constante nas inclinações entre $\pm 30^\circ$ da vertical. Bartholomew *et al.* (1987) salientaram que alguns servo-acelerômetros podem medir ângulos de até 90° acima da distância de 50 cm de comprimento, no entanto devido ao tamanho das sondas comumente usadas estes ângulos ficam próximos de 30° .

Teves (2013) citaram que os acelerômetros *MEMS* são sistemas microeletromecânicos projetados em escala micrométrica pela indústria dos circuitos integrados realizados a partir da associação de estruturas móveis, sensores, atuadores e eletrônica.

Machan e Benett (2008) citaram que os acelerômetros *MEMS*, são componentes que representam alternativas de baixo consumo de energia, durabilidade, transmissão sem fio e baixo custo. Inclusive, esses atributos resultaram no uso extensivo de *MEMS* na indústria automobilística. O uso de sensores *MEMS* em aplicações de inclinômetros é relativamente recente, desde 2005. Eberhardt e Stead (2011) salientaram o uso desta tecnologia tanto em sondas inclinométricas, quanto em inclinômetros fixos.

ETHW (2017) informou que os *MEMS* foram propostos pela primeira vez na década de 1960, mas não foram comercializados até os anos 80. Engenheiros e cientistas queriam usar técnicas de fabricação de circuitos integrados para fabricar pequenos sistemas mecânicos, que poderiam, se necessário, ser conectados a circuitos eletrônicos no mesmo *chip*. Em 1982, sistemas de *Airbag* automotivo (que haviam sido propostos na década de 1950) foram introduzidos usando sensores *MEMS* para detectar um acidente. A *Analog Devices Corporation* elaborou essa ideia, produzindo um “acelerômetro” para sistemas de *airbag* em 1991, cujas porções mecânicas e eletrônicas eram integradas no mesmo *chip*.

Yazdi *et al.* (1998) explicou que princípios físicos empregados na transdução, no caso dos acelerômetros *MEMS* há utilização principalmente de recursos de detecção capacitiva, piezoresistiva, piezolétrica, eletromagnética e óptica. Porém, o princípio físico com melhor desempenho tem sido a detecção por meio de medição de variação capacitiva. As razões para isso são a simplicidade do projeto do sensor, ser desnecessário o uso de elementos raros na natureza, o baixo consumo de energia e a estabilidade térmica significativa.

Toledo Junior (2018) citou que o princípio básico do funcionamento dos acelerômetros *MEMS* é o deslocamento de uma pequena massa de prova implantada na superfície de silício do circuito integrado e suspensa por pequenas vigas flexíveis. De acordo com a segunda lei de movimento de Newton, à medida que uma aceleração é aplicada ao dispositivo, uma força

também desloca a massa. As vigas de suporte atuam como uma mola, o fluido preso no interior do circuito integrado age como um amortecedor, resultando em um sistema massa-mola-amortecedor, como pode ser visto na Figura 62.

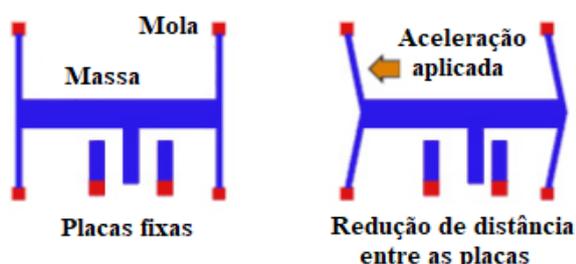


Figura 62 – Princípio de funcionamento do inclinômetro. (Fonte: Própria, 2019)

O mesmo autor realçou que embora exista uma gama de possibilidades para princípios de construção de acelerômetros, duas tecnologias são as mais comuns para detecção do deslocamento da massa, de maneira proporcional à aceleração aplicada, sendo eles os sensores de aceleração capacitivos e os piezoelétricos.

Os acelerômetros com sensores capacitivos produzem uma tensão dependente da distância entre duas superfícies planas. Uma ou ambas destas superfícies são carregadas com uma carga elétrica, e ao alterar a distância entre as placas através da inclinação, a capacitância elétrica do sistema também é alterada, e que pode ser medida na saída de tensão. (TOLEDO JUNIOR, 2018). Quanto aos piezoelétricos, se baseiam na deformação de um cristal, que por sua vez varia a tensão elétrica, e vice-versa, sendo uma deformação que pode ocorrer devido a aceleração.

Mouser Brasil (2019) explicou que os inclinômetros *MEMS* são acelerômetros e medem o componente da gravidade da Terra na direção de medição, conforme Figura 63. Isto significa que a saída é proporcional e pode ser traduzida matematicamente pela equação (54):

$$F_{gy} = g \text{ Sen}\theta \quad (54)$$

Na época, Machan e Benett (2008) informaram que existiam limitações para esta tecnologia, incluindo sensibilidade à temperatura e efeitos relacionados a ruído de sinal e resolução reduzida da vertical ($\pm 15^\circ$). Uma precisão de sistema de 2,5 a 6 mm /30 m ou 1: 25.000. Embora hoje já existam sensores inclinômetros *MEMS* com resolução na faixa de $\pm 30^\circ$ e precisões maiores pelos fornecedores *Texas Instruments*®, *Analog Devices*® e *Bosh*®.

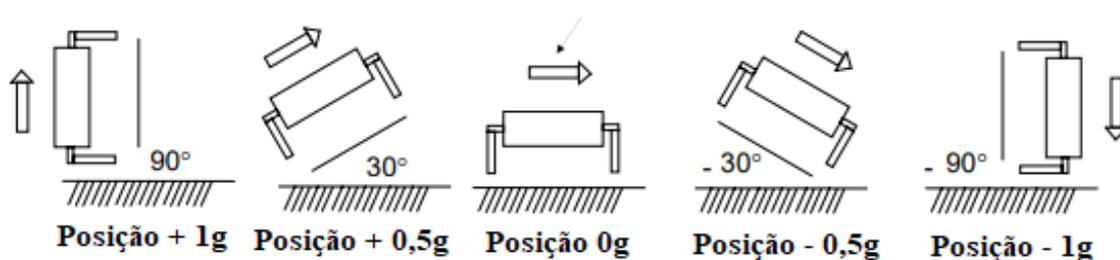


Figura 63 – Princípio de funcionamento do sensor *MEMS*. (Fonte: Mouser Brasil, 2019)

2.12.2.2 Tipos de tubos-guia

O tubo-guia é uma estrutura em cilindro vazado que possibilita o acesso da sonda do inclinômetro, permitindo obter medidas de deslocamentos abaixo da superfície, além de controlar a orientação da sonda através de ranhuras internas e estar em conformidade com o movimento do terreno circundante. (SLOPE INDICATOR, 2019)

Quanto ao material fornecido pela Geokon (2019), na montagem, os tubos-guia e os acoplamentos são rebitados juntos e as juntas são impermeabilizadas e protegidas com fitas adesivas, conforme Figura 64.

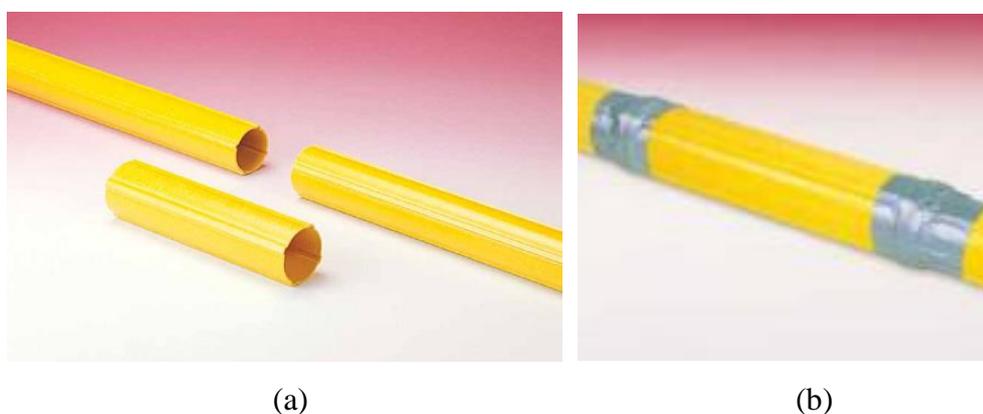


Figura 64 – Ilustração do modelo do tubo-guia da *Geokon*®: a) Modelo com quatro ranhuras; b) Montagem da junta e proteção com fita adesiva. (Fonte: Geokon,2019)

A carcaça do tubo-guia possui quatro ranhuras para as rodas se movimentarem e orientarem a sonda, espaçadas em intervalos de 90°, sendo ela fabricada a partir de fibra de vidro, garantindo uma carcaça leve, resistente ao meio ambiente e com sulcos livres de espiral. Segundo a Slope Indicator (2019), em termos geométricos, existem três tipos de tubos-guia que são geralmente utilizados e os descreve da seguinte maneira:

- a) o tubo-guia Ø85 mm (3,34”) é o mais adequado para todos os usos, especialmente recomendado para deslizamentos de terra e monitoramento a longo prazo. Também é apropriado para monitorar múltiplas zonas de cisalhamento ou zonas de cisalhamento muito estreitas;
- b) tubos-guia Ø70 mm (2,75”) são adequados para projetos de construção. Podem ser usados também para monitoramento da estabilidade de taludes apenas se houver um grau moderado de deformação;
- c) Por fim, o tubo guia Ø48 mm (1,9”) é usado apenas para situações que as deformações sejam muito pequenas e sejam distribuídas em zonas amplas, entretanto seu uso é incomum.

Como pode ser visto na Figura 65, em termos de modelos comercialmente disponíveis, a *Slope Indicator Co*® apresentou três tipos de revestimentos, sendo eles:

- a) revestimento *QC* que possuem acoplamentos que são embutidos e se encaixam com intuito de obter uma junta nivelada. Neste há um mecanismo de trava específico que engata completamente a circunferência interna da carcaça, proporcionando articulações muito mais fortes do que outros tipos de encaixe de tubos. Os mesmos são dispostos em diâmetros de externos de 70 e 85 mm, conforme Figura 65a ;
- b) revestimento padrão (*Standard*) que possuem acoplamentos precisamente moldados e que permitem uma colagem de alta resistência e para pequenos diâmetros tem acoplamentos integrais. Como vantagem, as articulações extra-fortes são úteis em poços muito profundos e poços de grandes dimensões em que o revestimento não é bem suportado. São dispostos em diâmetros de externos de 48 mm, 70 mm e 85 mm, conforme Figura 65b;
- c) por fim, o revestimento *EPIC* que representa uma carcaça econômica, a qual pode ser cortada e acoplada em qualquer ponto ao longo de seu comprimento. Neste tipo de revestimento é importante o cuidado quanto a selar a estrutura do tubo-guia, sendo disposto em diâmetro externo de 70 mm, conforme Figura 65c.

Green e Mikkelsen (1988) afirmaram que os tubos-guia dos inclinômetros podem ser de plásticos, liga de alumínio ou aço, com acoplamentos rígidos ou telescópicos. As carcaças plásticas podem ser em *ABS*, *PVC* ou fibra de vidro e as ranhuras podem ser conectadas por perfuração, extrusão ou moldagem. *ABS* é flexível e facilmente cimentado, porém o *PVC* menos. A espiral da ranhura da carcaça deve ser inferior a 1 grau /3,048 m. Em plásticos, um

tubo aberto parece ser mais resistente do que a carcaça de um extrudado, ainda assim, o calor gerado pela combinação entre o sol quente e o armazenamento inadequado pode deformar o invólucro inicialmente rígido.

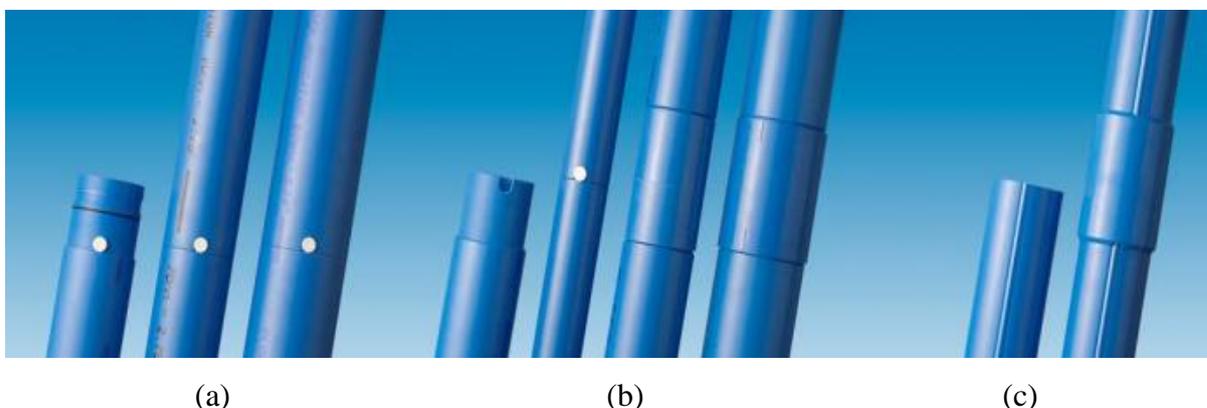


Figura 65 – Ilustração do modelo de tubo-guia da *Slope IndicatorCo*®: a) Modelo *QC* (*Quick Connect*); b) Modelo padrão (*Standard*); c) Modelo *EPIC*. (*Slope Indicator*,2019)

Dunicliff (1988) afirmou que o material *ABS* é comumente usado na fabricação de embalagens plásticas e adequado para a maioria das aplicações. Plásticos alternativos, como *PVC*, tendem a ser mais frágeis, especialmente em baixas temperaturas. As ranhuras do corpo são feitas por perfuração, mas em alguns casos o tubo é ranhurado durante a extrusão. Os diâmetros externos variam de 48 a 89 mm. Os plásticos *PVC* são fáceis de serem danificados durante a instalação, porém os acoplamentos de plástico são mais fáceis de se atingir uma vedação contra a intrusão de aterro do que os acoplamentos de alumínio ou fibra de vidro. Ainda assim, há uma preferência de tubos-guia de alumínio para instalação em grandes profundidades.

No mesmo trabalho, o autor traz à tona a existência de outros materiais utilizados como aço e alumínio, porém o revestimento de alumínio está sujeito a processos corrosivos, seja por água subterrânea ou por cal livre em argamassa de cimento usada durante a instalação. Quanto ao revestimento em aço, estes tubos são usados em medições em estacas metálicas, para que o custo de instrumentação deva ser minimizado e onde seja necessária uma precisão menor. Salienta-se o cuidado quanto ao uso de tubulação de aço extrudado que geralmente tem torção excessiva e não é recomendada, porém tubos soldados com menos costura não são excessivamente torcidos. (DUNICLIFF, 1988)

Stark e Choi (2008) citaram que após a conclusão do furo, os tubos de plástico de *PVC* são acoplados ou colados em comprimentos de 1,5 a 3,0 m. O invólucro é rebaixado no furo e

orientado de modo que o eixo principal esteja alinhado na direção do movimento. O sulco na direção do movimento deve ser marcado como $A0^\circ$ para facilitar movimentos futuros.

Silveira (2006) citou que a sua instalação deve ser feita de modo a ancorar a sua ponta em um referencial indeslocável [i.e., rocha]. Uma vez feita uma abertura com diâmetro maior que a tubo, o tubo é inserido cuidadosamente, de forma a manter a verticalidade, com intuito de reduzir todos os erros possíveis. Posteriormente, faz-se a compactação do solo ao entorno do tubo e assim são efetuadas as primeiras leituras, que são as leituras referência.

Dunicliff (1988) salientou a preocupação dos usuários quanto a relação entre a rigidez do tubo e a deformação sofrida pelo tubo em função da movimentação do solo. Afirmou que quando instaladas em solo mole, é provável que deformações em uma zona de cisalhamento distinta causem não conformidade local, de modo que as deformações cisalhantes sejam mais graduais do que a deformação real de fato. O mesmo autor também citou que o uso de grandes diâmetros onera a instalação do tubo-guia, porém aumentam a precisão das medidas.

Mikkelsen (2002) explicou que o aterramento de um instrumento de furo [i.e., piezômetro e/ou inclinômetro] é muitas vezes um aspecto negligenciado tecnicamente, sendo que a ausência do aterramento pode ser uma fonte de erros. Em muitas situações, as observações do instrumento podem refletir apenas um aterramento instável, falta de aterro ou aterramento excessivamente rígido ou muito macio. Areia, cascalho e vários produtos bentoníticos provaram ser muito difíceis de serem colocados e muitas vezes totalmente inadequados.

Stark e Choi (2008) consideraram a relevância deste aspecto, porém informaram que o preenchimento pode ser feito com *graute*, areia ou cascalho para garantir que os movimentos do revestimento do tubo reflitam o movimento do solo e não simplesmente o movimento do tubo no poço e salientaram que o aterro com *graute* é o mais desejável pois esta opção pode aumentar a rigidez da ligação solo/tubo possibilitando um aumento na precisão na leitura do deslocamento horizontal. Ainda assim, no caso da areia e/ou cascalho serem usados para preenchimento possibilitam que os vazios gerados na interface aterro/tubo facilite a deformação do tubo no vazio, o que conseqüentemente produziria erros nas medições do inclinômetro e/ou falsas indicações de movimento.

Em termos de produtos bentoníticos, Mikkelsen (2002) sugeriu evitar uso de misturas com bentonita e água pois é instável volumetricamente e considerou a possibilidade de introduzir de cimento ou cinza volante na bentonita. O cimento permite o controle da expansão da bentonita, sendo que a correta proporção destes materiais pode permitir uma dosagem com mesmo nível de forças no aterro circundante. Inclusive a Slope indicator (2019) sugeriu proporções de misturas de Cimento: Bentonita: Água de 1:0,3:2,5 para solos duros e médios (com resistência

à compressão de 0,69 MPa em 28 dias) e 1:0,4:6,6 para solos macios (com resistência à compressão de 0,03 MPa em 28 dias).

2.12.3 Procedimentos de leituras e aquisição de dados

Em termos de procedimentos de leituras, Stark e Choi (2008) e Dunicliff (1988) explicaram que inicialmente é gerada a leitura zero ou do perfil inicial que servirá de referência para as demais leituras e que deve ser estabelecida por pelo menos dois conjuntos de leituras. Dunicliff (1988) chamou a atenção de que em caso de dúvida, deve-se providenciar monitorar a deformação transversal absoluta do topo do tubo-guia regularmente, usando métodos de levantamento topográfico.

Stark e Choi (2008) e Dunicliff (1988) afirmaram que uma vez gerada a leitura zero, as medições de inclinação devem começar a partir do fundo estável do inclinômetro. De posse do comprimento da perfuração, a sonda deve ser baixada lentamente usando os intervalos no cabo (que variam de 0,5 m a 1 m) até a profundidade desejada. Antes de iniciar as medições de zero, a sonda deve ser mantida na posição por pelo menos 10 min para que a sonda possa se ajustar à temperatura no furo.

Dunicliff (1988) explicou que após descer a sonda inclinométrica biaxial e atingir o equilíbrio térmico em relação ao furo são seguidos alguns procedimentos:

- a) Faz-se as leituras em diferentes profundidades;
- b) Retira-se a sonda, rotaciona em 180° e novamente é abaixada para o mesmo ponto;
- c) Espera-se estabilizar a temperatura e faz-se as leituras nas diferentes profundidades;
- d) Realiza-se o exame da validação das somas de verificação.

O procedimento de rotação da sonda em 180° é necessário para distribuição dos erros da leitura (posição do sensor, folga no travamento das rodas etc.). Stark e Choi (2008) complementaram explicando que as primeiras medições após as leituras “zero”, a sonda é abaixada até a parte inferior da tubo-guia com as rodas na ranhura A0°. Quando a sonda atinge a parte inferior do inclinômetro, o cabo é preso nas garras da polia no marcador de pé correspondente à profundidade mais baixa alcançada nas leituras iniciais. Considerando a Figura 66, a sonda deve ser então levantada para a superfície nos incrementos pretendidos com leituras das direções A0° e B0° em cada intervalo. O intervalo de medição igual à base da roda da sonda é comumente usado para atingir a precisão máxima.

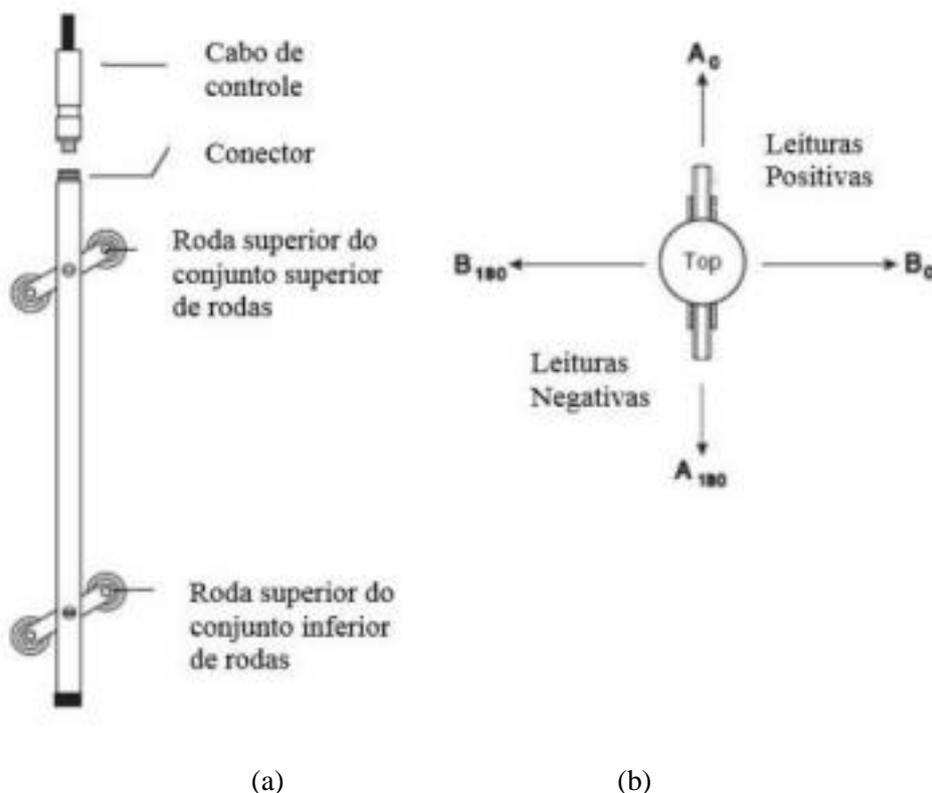


Figura 66 – Desenho esquemático da sonda inclinométrica: a) vista lateral; b) vista superior. (Fonte: De Souza *et al.*, 2016)

A direção B_0° está a 90° , no sentido horário a partir do A_0° , e a inclinação no eixo B é medida pelo segundo sensor na sonda. Depois que todas as leituras são feitas com as rodas na ranhura A_0° e a sonda atinge a superfície, a sonda é cuidadosamente removida e girada em 180° para que as rodas inferiores sejam inseridas na ranhura A_0° e outro conjunto de leituras seja obtido na A_{180}° e B_{180}° direções.

De Souza *et al.* (2016) salientaram que o tubo guia deve ter comprimento mínimo de 5 metros de seu trecho inferior fixado abaixo da maior profundidade na qual se espera algum movimento. Assim é possível considerar a extremidade final desse tubo um referencial fixo.

Bartholomew *et al.* (1987) citaram que a sonda do inclinômetro mede ângulos de inclinação da vertical em dois planos orientados a 90° (ortogonais) entre si, podendo ser uniaxiais e biaxiais, conforme apresentado na Figura 67. Em sondas uniaxiais, caso os dados de deformação em ambos os planos verticais forem necessários, serão realizados mais duas séries de medidas alinhando as rodas da sonda no segundo par de ranhuras, ou seja, 90° em relação a primeira. (DUNICLIFF, 1988)

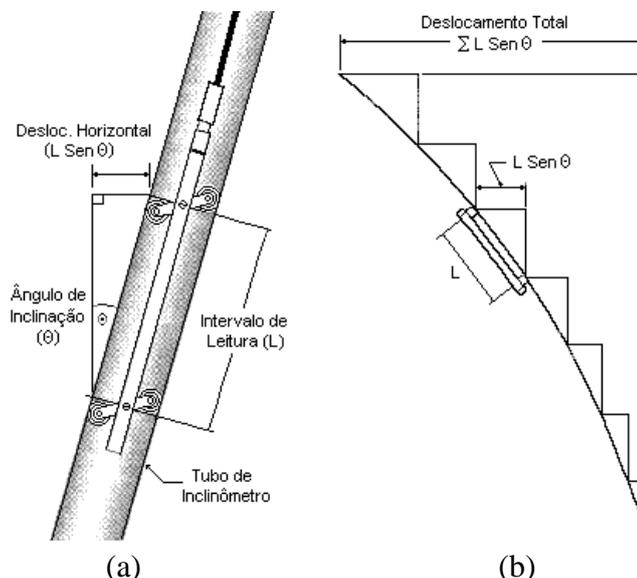


Figura 67 – Desenho esquemático do procedimento de leitura: a) detalhe da sonda inserida no tubo; b) leitura do inclinômetro em toda extensão do tubo. (Fonte: Adaptado de Dunicliff, 1988)

Stark e Choi (2008) esclareceu a importância de usar a mesma sonda (diminuir possíveis erros) e medir os deslocamentos nos mesmos intervalos de profundidades da leitura inicial. O desvio do deslocamento vertical, isto é, deslocamento horizontal (ver a Figura 67), é determinado por uma função senoidal através da Equação (55).

O desvio vertical em cada intervalo de medição é a posição lateral do tubo-guia em relação a extremidade fixa. O deslocamento horizontal total, isto é, o deslocamento cumulativo, o perfil da carcaça é obtido pela soma dos desvios laterais individuais entre a extremidade fixa e o topo do tubo-guia, conforme equação (56).

$$\delta_{DH} = L_i \sin \theta \quad (55)$$

$$\delta_{DHT} = \Sigma \delta_{DH} \quad (56)$$

2.12.4 Erros, acurácia e sensibilidade de medições com inclinômetro

Green e Mikkelsen (1988) e Stark e Choi (2008) afirmaram que a precisão e a confiabilidade da posição medida ou do perfil de deslocamento dependem da qualidade da carcaça, da sonda, do cabo, da leitura e dos acessórios selecionados.

Uma sonda mal projetada, cabo elástico, leitura defeituosa ou corpos do equipamento com baixa qualidade irão produzir dados não correspondentes com os reais. Algo bastante relevante que deve ser considerado é a qualidade dos sensores (resolução, sensibilidade, *offset*, acurácia e precisão) a fim de representar de maneira fiel os deslocamentos ocorridos.

Dunicliff (1988) e De Souza *et al.* (2016) citaram que as rodas do sensor, comumente, apresentam uma certa folga em relação a direção ortogonal, o que redundaria em medidas com maiores erros acidentais no ‘Eixo B’. Essa folga tem origem nas imperfeições presentes nas ranhuras do tubo, ou pelo desgaste das próprias rodas do sensor.

O erro é uma combinação de erros aleatórios e sistemáticos e é importante em deslizamentos de terra que não se moveram significativamente. Se o movimento medido em um inclinômetro de inclinação não exceder a precisão do campo do sistema, o consultor / especialista deve visualizar esse movimento com cuidado e avaliar se está dentro do erro esperado da sonda. (STARK E CHOI, 2008)

Mikkelsen (2003) em seu trabalho relacionou quatro erros sistemáticos que ocorrem nas medições realizadas com inclinômetro e prováveis maneiras de correção destes erros. Os erros sistemáticos elencados pelo autor foram:

- a) Mudança de inclinação (*Bias shift error*);
- b) Desvio de sensibilidade;
- c) Erro de rotação;
- d) Erro de posição da profundidade.

A mudança de inclinação, também chamada de deslocamento de desvio ou deslocamento zero, representa um erro sistemático de desvio de tendência que está relacionado a uma pequena alteração na inclinação da sonda do inclinômetro ao longo do tempo. Esta alteração é percebida a partir da soma de verificação (“*Checksum*”), comparando as leituras de $A0^\circ$ e $A180^\circ$. Mikkelsen (2003) expressou a correção do erro da mudança de inclinação na equação (57):

$$bs = BSE / (N_L \times C_{in}) \quad (57)$$

Obs: C_{in} é igual a 0,01mm para sondas de 500mm.

O desvio de sensibilidade representa um desvio do amplificador de operação no pré-amplificador da sonda. O desvio de sensibilidade é diretamente proporcional à magnitude das leituras e varia entre os conjuntos de dados, mas é relativamente constante para cada conjunto.

Este representa um erro incomum, mas de difícil diagnóstico. Nesses casos, o erro é sanado através da calibração do fator C (informado na equação 57). (MIKKELSEN, 2003; STARK e CHOI, 2008)

Quanto ao erro de rotação, Stark e Choi (2008) explicaram que ocorre quando o corpo do inclinômetro se desvia significativamente da vertical. Se o eixo de detecção do acelerômetro no eixo A é levemente desalinhado em direção ao eixo B, o acelerômetro do eixo A será sensível a inclinação no eixo B. O componente B na leitura do eixo A é o erro de rotação do eixo, conforme a equação (58) e Figura 68.

$$\Delta_{\text{error}} = \sin^{-1} (\Delta_{\text{desvio}} / \delta_{DH}) \quad (58)$$

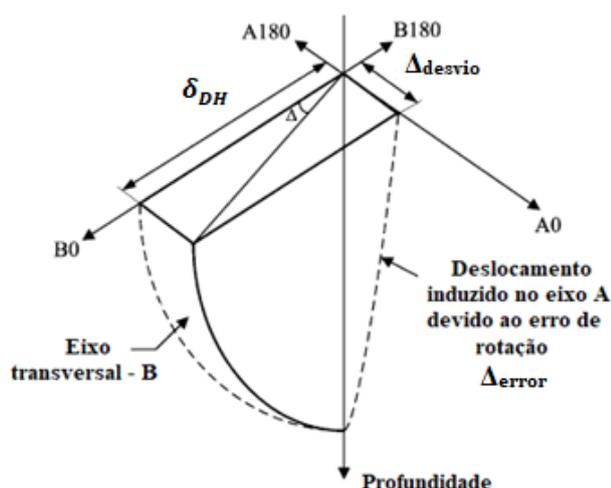


Figura 68 – Desenho esquemático da ocorrência de erro de rotação em inclinômetros. (Fonte: adaptado de Mikkelsen, 2003)

Mikkelsen (2003) informou que a causa deste tipo de erro é baseada em mudanças no alinhamento do acelerômetro com o tempo ou desalinhamento inicial de muito menor de um grau. Stark e Choi (2008) salientaram que atualmente o *software* de aquisição e tratamento de dados dos fabricantes fazem estes ajustes, assim como de utilizar a mesma sonda em todo o processo de monitoramento. Essas correções podem ser realizadas com auxílio de componentes como o giroscópio e o magnetômetro.

Por fim, o erro de posição da profundidade (ver a Figura 69), que segundo Stark e Choi (2008) e Mikkelsen (2003) resulta da sonda inclinométrica sendo posicionada em profundidades diferentes das leituras inicial de referência. A diferença na posição vertical da

sonda é geralmente causada por uma alteração na referência do cabo, no comprimento do cabo e/ou compressão ou deslocamento do tubo.

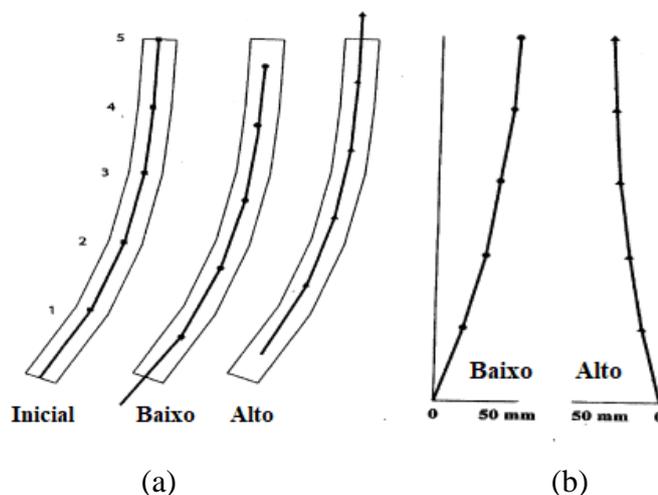


Figura 69 – Desenho esquemático da ocorrência de erro de posição em profundidade: a) posicionamento da sonda; b) deslocamento refletido. (Fonte: adaptado de Mikkelsen, 2003)

Mikkelsen (2003) ilustrou através da Figura 69a como a variação de posicionamento pode refletir na resposta de deslocamento gerada pela sonda conforme Figura 69b. Quando a sonda se encontra numa posição mais baixa, ou seja, mais positiva produz mudanças positivas desde que as leituras se tornem mais positivas com profundidade. Já quando, a sonda encontra-se numa posição mais alta, ou seja, mais negativa há uma tendência de mudanças negativas e assim o efeito é contrário. O mesmo autor sugeriu em seu trabalho uma formulação de correção deste tipo de erro através da equação (59):

$$DPE = S_L \times DPS \quad (59)$$

Stark e Choi (2008) e Mikkelsen (2003) informaram, baseados empiricamente em uma gama de projetos realizados pelo *Slope Indicator Co*®, que a faixa de acurácia de campo ocorre em $\pm 7,8$ mm/30m. Mikkelsen (2003) detalhou essa faixa de valores informando que o erro total representa uma combinação de erros aleatórios e sistemáticos. A variação supracitada foi obtida a partir de 60 leituras em faixas de 0,5 m (totalizando 30 m) considerando o erro aleatório típico igual a $\pm 0,16$ mm (baseado em checagem de valores), cujo valor total do erro aleatório é igual ao produto deste valor pela raiz do total de leituras, ou seja, 1,24 mm.

Quanto ao erro sistemático, o mesmo possui um valor típico de $\pm 0,11$ mm, cujo total representa o produto do valor típico pela profundidade, logo 6,60 mm. Foi salientado que em intervalos específicos, [i.e., zonas de cisalhamento] a variação dos erros aleatórios reduz-se para $\pm 0,02$ mm.

2.12.5 Inclinômetros experimentais

Machan e Benett (2008) elencou algumas tecnologias em desenvolvimento, que seriam incrementos modernos ou equivalentes a um inclinômetro [e.g., cabo TDR, inclinômetros digitais com *bluetooth*, inclinômetros fixos com introdução de tecnologia *Wireless*, inclinômetro com fio de vibração e inclinômetros com fibra ótica]. Existem três trabalhos referentes ao desenvolvimento e construção de protótipos de inclinômetros experimentais que são de Formoso (1999), Penz (2013) e Covassi *et al.* (2018).

Formoso (1999) desenvolveu um protótipo de inclinômetro (ver a Figura 70e) intermitente em aço inoxidável com dois transdutores de inclinação, posicionados com defasagem de 90° , sendo munidos de sensores de efeito *Hall*. Segundo o autor, a escolha do transdutor foi inspirada na célula de tensão cisalhante de contorno utilizada por Bica e Clayton (1989).



Figura 70 – Torpedo inclinômetro: a) transdutor com a base móvel; b) detalhe do sensor de efeito *hall*. (Fonte: Formoso, 1999)

Como pode ser visto na Figura 70, o transdutor não foi fabricado como uma peça única, sendo constituído por duas bases maciças vinculadas por duas vigas muito finas (lâminas de aço), assemelhando-se a um pórtico flexível. Desta forma, quando o transdutor é inclinado da

vertical, surgem deslocamentos gerados por flexão e cisalhamento devido ao seu próprio peso. A Figura 71 ilustra o detalhamento em seção longitudinal e o corpo do inclinômetro já montado.

Penz (2013) desenvolveu um inclinômetro de dimensões reduzidas denominado SADI (Sistema de Aquisição de Dados de Inclinação) constituído por uma sonda com presença de circuitos elétricos de medição e sensores *MEMS* que realiza medições instantâneas nos dois sentidos ortogonais em relação ao eixo da sonda, além disso o mesmo foi concebido com interface ao usuário através computadores pessoais [i.e., *notebook*, *tablet* ou *Windows phone*] e sistema sem fio para envio de dados em profundidade, conforme Figura 72.

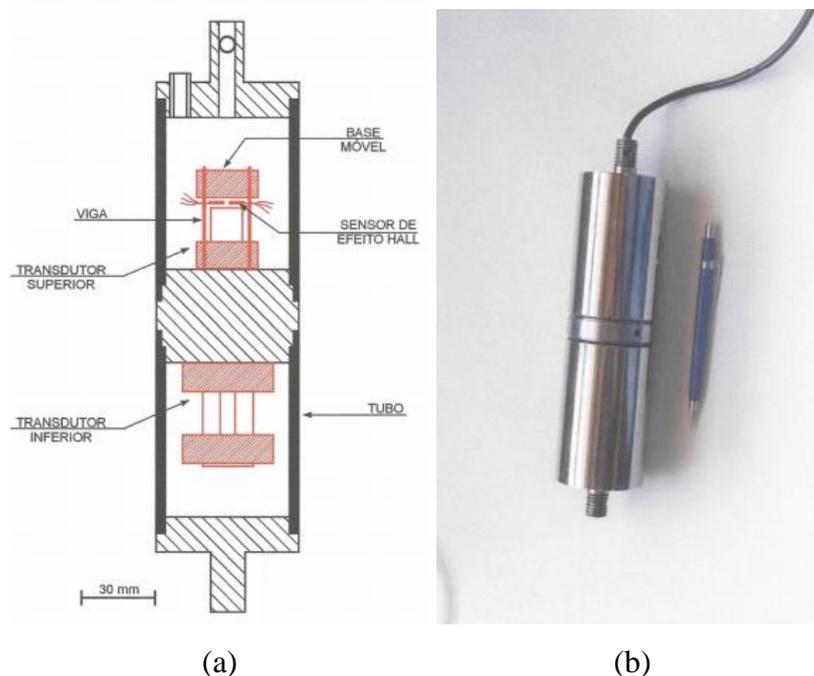


Figura 71 – Torpedo inclinômetro. a) Detalhe em seção longitudinal da sonda; b) sonda construída. (Fonte: Formoso, 1999)

O inclinômetro *MEMS* utilizado foi SCA 100T-D02 devido ao alcance de medição ($\pm 90^\circ$). Para realização da interface entre o equipamento e o usuário, assim como alimentar o sistema elétrico da sonda foi desenvolvida uma placa FDC [i.e., Fonte, Drive e Controle]. Esta placa apresentava um microcontrolador PIC 16F876A complementado a um programa desenvolvido para condicionar, receber e converter o sinal do sensor *MEMS*, além de permitir a comunicação sem fio *Bluetooth* para envio de dados, como pode ser visto na Figura 73.



Figura 72 – Sonda SADI. (Fonte: Penz, 2013)

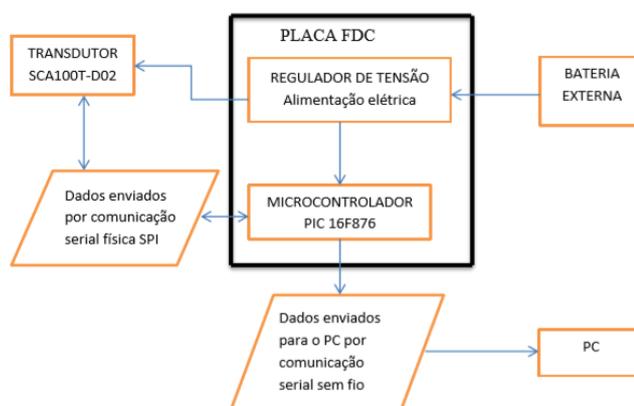


Figura 73 – Operação da placa FDC. (Fonte: Penz, 2013)

Covassi *et al.* (2018) apresentaram uma modelo de vigas de inclinação, ou também chamada de viga inclinométrica, (ver a Figura 74) constituídas por barras de alumínio e um sistema de inclinômetro, sendo elas úteis para medidas, em caráter estático, de variações de deslocamentos verticais, ou seja, recalques, assim como variações de ângulos.

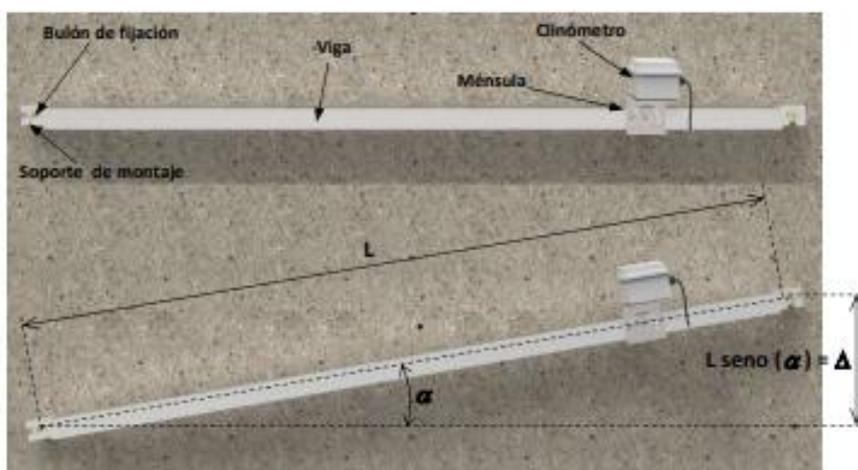


Figura 74 – Vigas de inclinação. (Fonte: Covassi *et al.*, 2018)

Nesta viga de inclinação os principais componentes do módulo eletrônico do inclinômetro (ver a Figura 75) são: sensor *MEMS* inclinado, microcontrolador de baixa potência de 8 *bits*, sistema de regulação de tensão e interface de comunicação *SDI-12*. O microcontrolador de 8 *bits* é responsável por comunicar os dados obtidos pelo sensor *MEMS* com o sistema de comunicação sem fio através da interface de comunicação *SDI-12*.

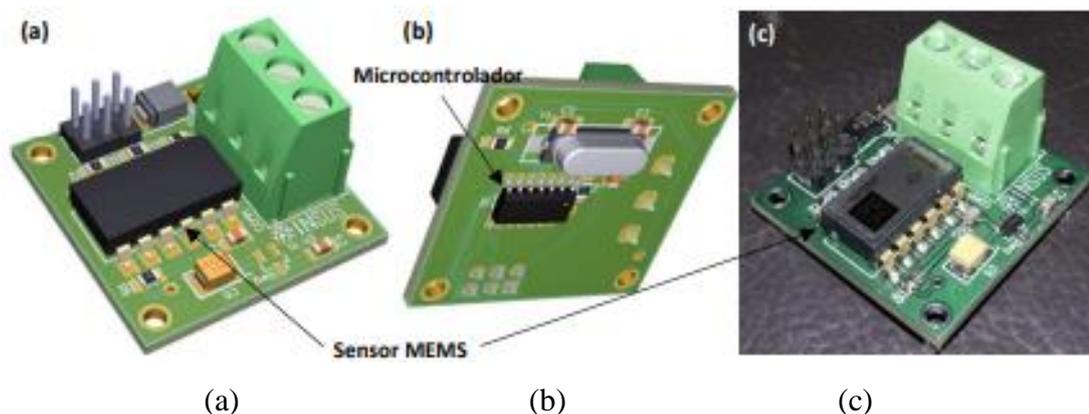


Figura 75 – Ilustrações do módulo de inclinômetro eletrônico MEMS: a) Vista superior; b) vista inferior; c) fotografia do sensor final. (Fonte: Covassi *et al.*, 2018)

Covassi *et al.* (2018) apresentou algumas possibilidades de aplicações das vigas de inclinação, podendo ser aplicadas em monitoramento de túneis ou escavações em perímetros urbanos ou até exercendo função de perfilômetro em aterro artificiais e/ou barragens de terra, conforme Figura 76.

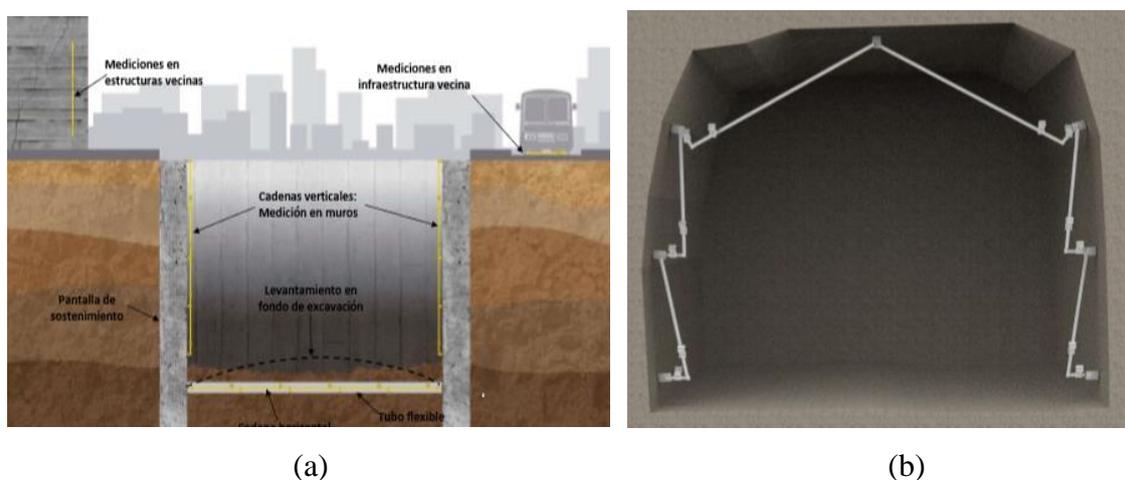


Figura 76 – Aplicações das vigas de inclinação em obras de escavação: a) obras subterrâneas; b) de túneis. (Fonte: Covassi *et al.*, 2018)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa em questão é composta por uma série de atividades e ensaios elencadas no fluxograma (ver a Figura 77) e que estão relacionadas à parâmetros e resultados que são necessários para o atendimento dos objetivos deste trabalho. O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de compreender o efeito da espessura da camada melhorada e da espessura da coluna granular compactada dinamicamente no solo estudado. Além disso, foram verificados os efeitos da altura de queda e a distância do ponto de impacto com o objetivo de se obter uma relação de *PPV* neste tipo de solo.

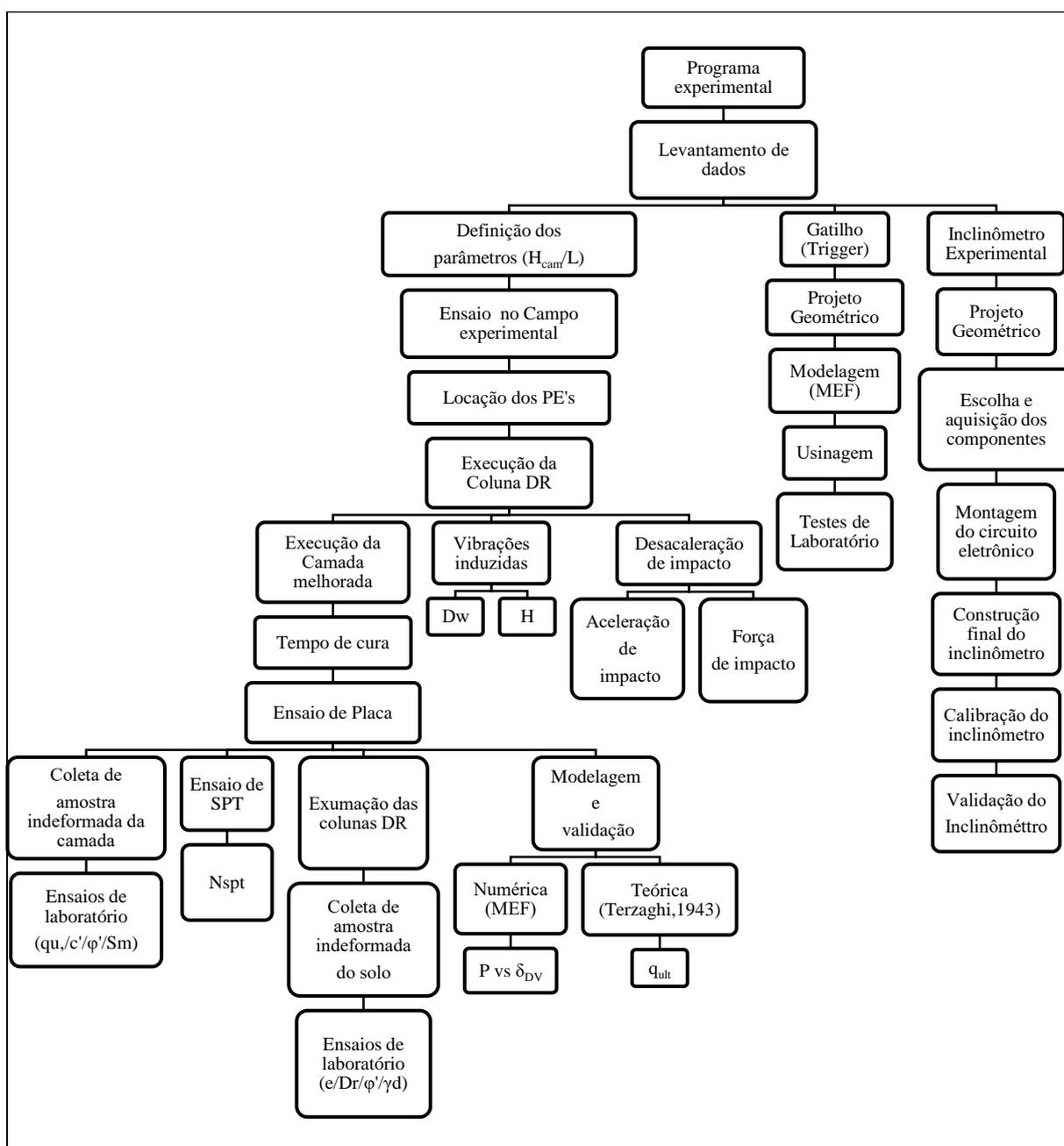


Figura 77 – Fluxograma da pesquisa experimental. (Fonte: Própria, 2021)

Inicialmente, foram analisados, projetados e testados o inclinômetro experimental (Apêndice A) e o gatilho de DC (Ver o Apêndice B). Em seguida se partiu para as pesquisas de campo experimental que apresentaram como variáveis investigadas (H_{cam} e L) delimitadas pelas variáveis fixas e com variáveis respostas anunciadas por meio da Tabela 13.

Tabela 13 – Matriz de variáveis envolvidas nas pesquisas de campo. (Fonte: Própria, 2019)

Variáveis investigadas	Variáveis Fixas	Variáveis respostas
<ul style="list-style-type: none"> • L • H_{cam} 	<ul style="list-style-type: none"> • Dosagem da camada melhorada (7% C + $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$) • Tipo do solo - Solo de Passo Fundo/RS • $W = 55 \text{ kN}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • q_u (Mpa) • N_{spt} (golpes) • c' (kPa) e ϕ' (°) • e e D_r (%) • P (kN) vs δ_{DV} (mm)

Como variável de ruído, a heterogeneidade da mistura e a sucção do solo e da camada melhorada foram consideradas. Experimentalmente, o ensaio de placa na superfície rígida do solo estudado e foi comparado com o resultado de Dalla Rosa (2004) para entender a variação das respostas do solo laterítico em diferentes profundidades. Após isto, a partir das variáveis a serem investigadas foi definida a matriz de ensaios de estudos no campo experimental da UPF em Passo Fundo/RS.

Foram realizados ensaios de placa com D_{pl} igual a 30 cm, com as espessuras de camada melhorada expressas na Tabela 14, obedecendo assim a razão H_{cam}/D igual a 0,5 e 1,67 (para observar um comportamento flexível e rígido). Infelizmente não houve fixação do comprimento das colunas em função de dificuldades sobre o controle. O γ_d e o C% da mistura foram definidos com base no estudo de rupturas de camadas melhoradas a serem informadas no item 5.4 e detalhamento das colunas granulares encontram-se no apêndice C.

Tabela 14 – Matriz de ensaios de campo. (Fonte: Própria, 2021)

PE	Variáveis investigadas		
	H_{cam} (m)	Coluna granular (m^3)	$H_{cam} + L$ (m)
I	0,15		1,10
II	0,50	V_1	0,90
III	---		1,00
IV	0,15		1,55
V	0,50	$2V_1$	1,25
VI	---		1,60

Método da substituição dinâmica aplicado a solo laterítico argiloso

Finalizados os ensaios de placa supracitados foi feita uma campanha de ensaios laboratoriais com amostras providas dos ensaios de campo com o objetivo de se obter os parâmetros de resistência do solo e da eficiência da compactação. A relação da campanha pode ser visualizada na Tabela 15 a seguir. Após os ensaios de campos, todos os resultados foram comparados com os resultados obtidos por Giese (2019).

Tabela 15 – Matriz de ensaios de laboratório das amostras de solos e ensaios de campo. (Fonte: Própria, 2021)

Ensaio	Qtde. de amostras	Condição	Parâmetro	Referência
Resistência à compressão simples	20	indeformada	q_u	Camada melhorada
Ensaio de Sucção	16	indeformada	S_m	Camada melhorada
Ensaio triaxial CID	6	Moldada	c / ϕ'	Area de Osório/RS
Ensaio triaxial CID	6	Moldada	c / ϕ'	Camada melhorada
Compactação	8	indeformada	e / D_r	Solo de Passo Fundo/RS
Compactação	10	indeformada	γ_d	Areia de Osório/RS
Ensaio de SPT	4	indeformada	N_{spt}	Solo de Passo Fundo/RS + Areia de Osório/RS

Foram realizadas 10 medições de vibrações a partir dos experimentos de compactação dinâmica, variando alturas de queda e distâncias de leituras, conforme matriz a seguir Tabela 16. Vale Salientar que foi obtida a leitura de série de golpes pra avaliar o efeito do decaimento ou aumento da velocidade de propagação de ondas em diferentes direções e da velocidade resultante. Além disso, o experimento teve como objetivo observar a magnitude das frequências de maiores energias com interpretação em *PSD*.

Tabela 16 – Matriz de ensaios de medição de vibração. (Fonte: Própria, 2020)

ID	Altura de queda (m)	Distância em relação ao eixo do martelo (m)	Quantidade de golpes (unid)
1	3	2,6	1
2	3	4,6	1
3	3	6,6	1
4	5	2,6	1
5	5	4,6	1
6	5	6,6	1
7	8	2,6	1
8	8	4,6	1
9	8	6,6	1
10	8	4,6	7

4 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios da pesquisa, em questão, foram o cimento CP V ARI RS, areia de Osório e água destilada. Nos itens 4.1, 4.2 e 4.3 serão caracterizados os materiais utilizados.

4.1 CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL – CP V ARI RS

Segundo a NBR 16697 (2019), o cimento CP V ARI RS é constituído de 90 a 100% de clínquer e sulfato de cálcio com inexistência ou adição de até 10% de material carbonático. Em linhas gerais, este produto possui um alto desempenho e tem como principais características as altas resistências inicial e final, além de apresentar uma maior durabilidade em meios agressivos.

A escolha do cimento CP V ARI RS se dá pela aceleração do ganho resistência nas primeiras idades de cura e assim minimizar o tempo de espera para realização dos estudos. Cruz (2008) demonstrou que o cimento CP V ARI RS atinge valores de resistência de compressão simples em 3 dias equivalentes aos de 28 dias de cura de um cimento CP IV, e aos 7 dias de cura equivalentes aos de 28 dias de cura de um CP III. De acordo a NBR 16697 (2019), esse cimento pode atingir resistência à compressão mínima de 14 MPa em 1 dia, de 24 MPa em 3 dias e de 34 MPa em 7 dias.

4.2 AREIA DE OSÓRIO/RS

A areia de Osório/RS foi escolhida por ser um material disponível na região, aliado ao fato de ser um agregado que atende critérios granulométricos de preenchimento expressos na literatura. Segundo Vendrusculo (2003), a areia de Osório/RS caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. Streck *et al.* (2002) classificou a pedologia deste solo como Neossolo Quartzarênico Órtico Hidromórfico típico pertencente a região costeira gaúcha.

Spinelli (1999) afirmou que corresponde a uma areia 99% quartizosa apresentando componentes residuais de glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Dalla Rosa (2009) realizou microscopia de varredura na areia de Osório/RS e constatou distribuição uniforme dos

grãos, forma arredondada e rugosidade moderada, conforme ilustrado na Figura 78. Abaixo na Figura 80 e Tabela 17 apresentam a curva granulométrica e os índices físicos, respectivamente.

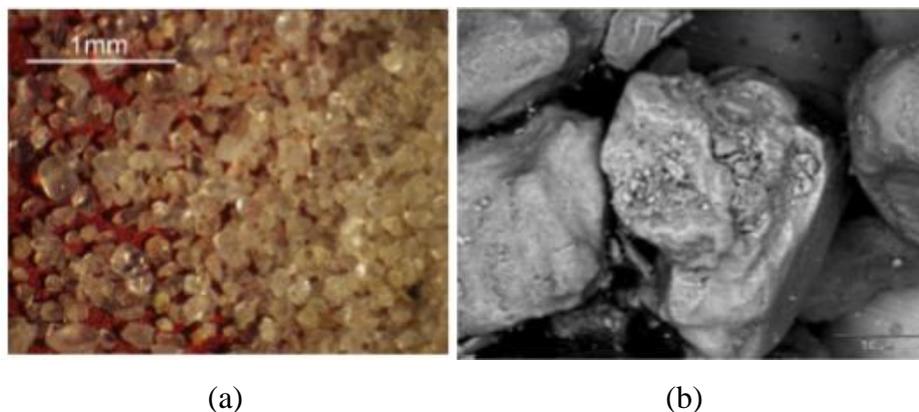


Figura 78 – Microscopia de varredura realizada na areia de Osório/RS: a) Imagem ampliada a 40 vezes; b) Imagem ampliada 500 vezes. (Fonte: Dalla Rosa, 2019)

Antes da confecção das colunas granulares, foram realizados ensaios de caracterização da Areia de Osório/RS e estabelecidas comparações com os dados obtidos por Cruz (2008) e Festugato (2008) e Ruver (2011) para comprovar se material era de fato o solicitado. Inicialmente foi coletada uma pequena amostra de solo e avaliada as suas características e como pode ser visto na Figura 79 a seguir, o material apresenta uma geometria angulosa, tonalidade transparente, com presença de sedimentos aliada e textura fina condizentes com a areia de Osório/RS.

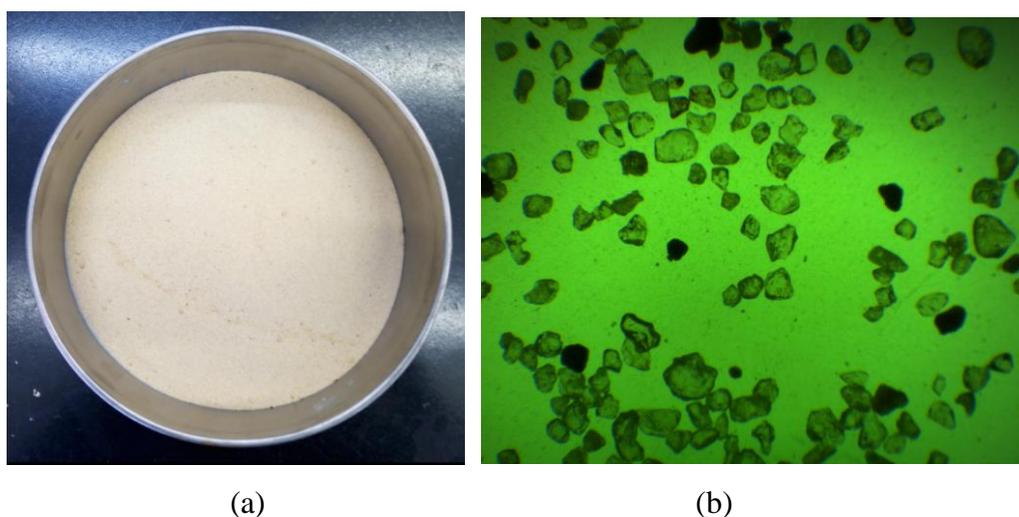


Figura 79 – Areia de Osório/RS: a) visão macroscópica do material; b) visão microscópica do material. (Fonte: Própria, 2020)

Quanto a análise granulométrica, foi utilizada a norma do DNIT 419 (2019) e como pode ser visto na Figura 80, o gráfico de distribuição dos grãos guarda grande semelhança com a curva obtida por Cruz (2008), sendo a maior concentração do material retida na peneira #100.

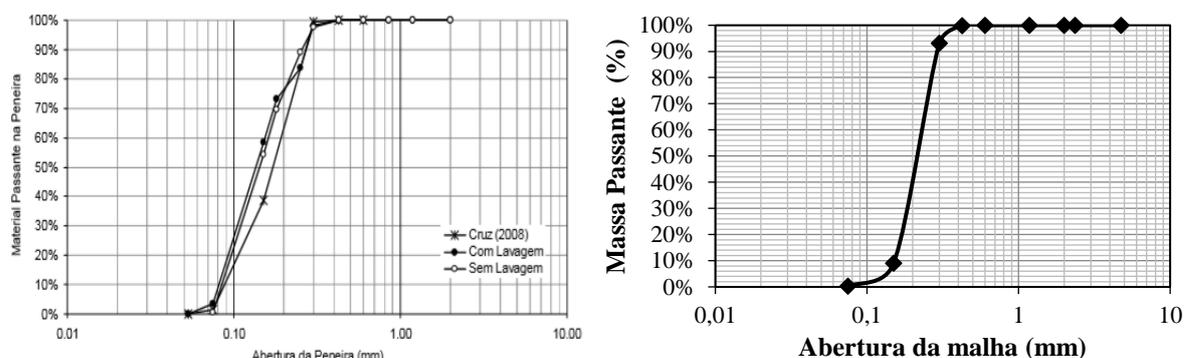


Figura 80 – Comparação das curvas granulométricas da areia de Osório/RS obtidas em laboratório por Ruver (2011), Cruz (2008) e o presente estudo. (Fonte: Própria, 2021)

Após a classificação granulométrica, foram realizados ensaios complementares de caracterização, como o de peso específico real dos grãos através do frasco de Chapman, com base na DNER-ME 194 (1998). Também foram obtidos dos índices de vazios máximos e mínimos, ambos a partir da NBR 16840 (2020) e NBR 16843 (2020), respectivamente. Ao finalizar os ensaios, os resultados foram organizados e comparados na Tabela 17.

Tabela 17 – Comparação de Índices físicos da Areia de Osório/RS obtidos em laboratório com os resultados de Cruz (2008). (Fonte: Própria, 2021)

Índices físicos	Valores		
	Cruz (2008)	Festugato (2008)	Obtidos
γ_g (kN/m ³)	26,5	26,20	26,18
C_u	2,11	2,00	1,50
C_c	1,15	1,00	0,94
D_{10} (mm)	0,09	0,11	0,16
D_{50} (mm)	0,17	0,16	0,22
e_{\min}	0,60	0,60	0,62
e_{\max}	0,85	0,90	0,90

Obs: Neste estudo, a interpretação dos resultados da areia de Osório tomou como base o valor de $\gamma_d = 26,2$ kN/m³ e índices de vazios (e) igual a 0,90 com base nos estudos Festugato (2008).

Pela classificação abordada em ASTM (1993), a areia de Osório/RS é classificada como SP, ou seja, uma areia não plástica (Consoli *et al.*, 2009a, 2009b, 2009c, 2009d), cuja umidade higroscópica, em função da sazonalidade temporal, oscilou entre 4,28% a 15% (RUVÉR, 2011), entretanto Cruz (2008) citou em seu trabalho que o material em estado seco se encontrava em 0,38%.

Festugato (2008) realizou ensaios triaxiais CID na areia de Osório/RS com densidade relativa de 50%, medianamente compacta, para tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, onde percebeu-se que independente do aumento da tensão confinante das amostras, não houve presença de picos, ou seja, um comportamento elástico perfeitamente plástico (ver a Figura 81a) e comportamento dilatante (ver a Figura 81b).

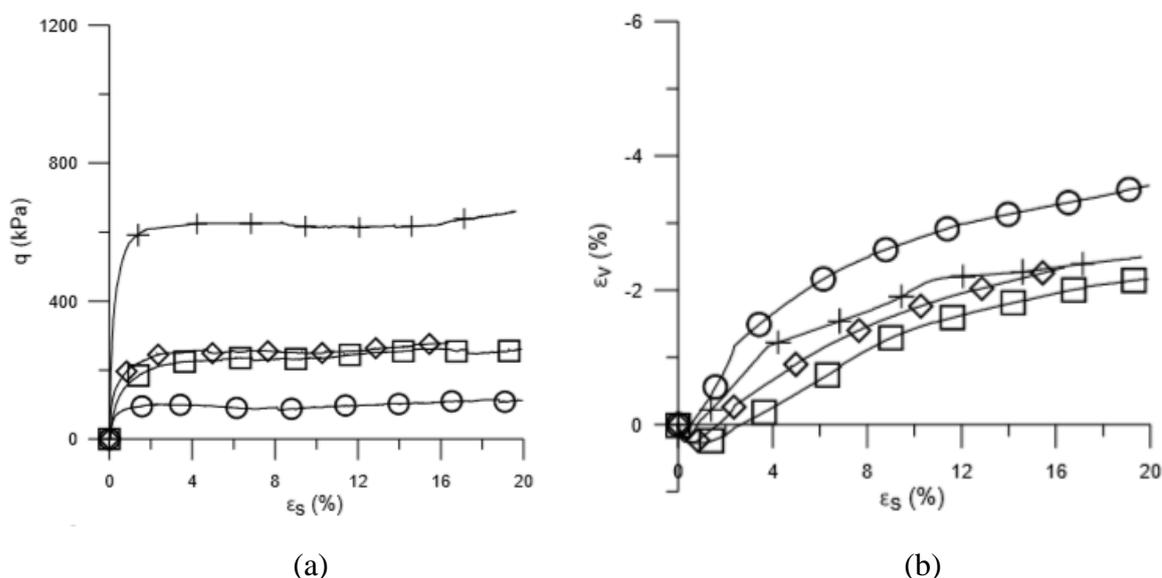


Figura 81 – Ensaios triaxiais CID realizados na areia de Osório/RS com σ_3 de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa: a) Avaliação da tensão tensões em função da deformação transversal; b) Avaliação da deformação volumétrica em função da deformação transversal. (Fonte: Festugato, 2008)

A seguir, na Tabela 18, podem ser visualizados os valores dos φ' da areia de Osório, em função de diferentes tensões confinantes e densidades relativa. Como pode ser visto, os valores φ estão enquadrados entre $33,5^\circ$ a 37° em estado medianamente compacto.

Consoli *et al.* (2010) apresentaram a comparação entre as curvas normalizadas q_u vs η/C_{iv} e q_t vs η/C_{iv} da areia de Osório/RS melhorada com cimento Portland CP V ARI considerando 3 índices de vazios (0,64, 0,70 e 0,80) e sete teores de cimento (1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12%) com tempo de cura de 7 dias, sendo as últimas 24h com as amostras submersas em água, conforme Figura 82. Como esperado, foi possível perceber que a medida que houve a

incorporação de cimento Portland concomitante a redução volume de vazios (porosidade), em ambos os casos, havia aumento exponencial do ganho de resistência de mecânica de tração e compressão em condições não confinada.

Tabela 18 – Relação de ensaios triaxiais realizados com areia de Osório/RS (Fonte: Adaptado de Corte, 2016)

Autores	σ_3 (kPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	ϵ_{min}	e	Dr(%)	ϕ' (°)
Casagrande (2005)	20/100/200/400			0,75	50%	33,5
Marcon (2005)	50/100/200			0,71	63%	34,9
Festugato (2008)	50/100/200	0,9	0,6	0,75	50%	37,0
Corte (2016)	50/100/150			0,75	50%	35,0

Este comportamento deve-se ao aumento de ligações químicas (adesão) geradas pela hidratação do cimento incorporado no solo associado ao atrito entre grãos (contato friccional entre as superfícies dos grãos). Além disso, conclui-se também que a razão de q_t/q_u é igual a 0,15, ou seja, a resistência à compressão diametral (tração indireta) é igual a 15% da resistência à compressão não confinada do solo.

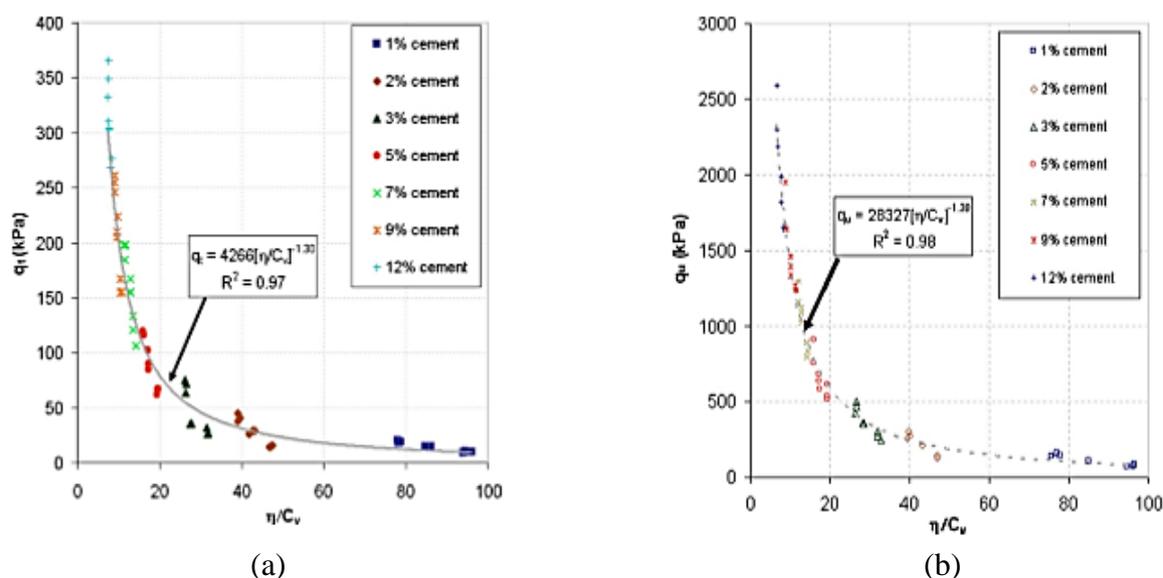


Figura 82 – Resistência mecânica da Areia de Osório/RS artificialmente cimentada com cimento CP V ARI RS: a) Curva normalizada q_u vs η/C_{iv} ; b) Curva normalizada q_t vs η/C_{iv} . (Fonte: Consoli *et al.*, 2010)

Heineck *et al.* (2005) compararam os comportamentos de tensão desviadora vs deformação cisalhante e de deformação volumétrica vs deformação cisalhante entre a areia de Osório/RS para três níveis de tensões confinantes (20 kPa, 100 kPa e 200 kPa) através de ensaios triaxiais CID, onde foi constatado uma resposta elástica perfeitamente plástica e comportamento dilatante, de forma similar a Festugato (2008), como visto na Figura 83.

Nesta mesma areia, Consoli *et al.* (2009c) realizaram ensaios de compressão simples e 18 ensaios triaxiais com tensões σ_3 de 20 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 3 relações de V_v/V_{ce} (10, 17 e 30) e estabeleceram equações de estimativas dos parâmetros c' , ϕ' , G_o e da razão V_v/V_{ce} , assim como obtiveram uma relação de G_o/q_u em função V_v/V_{ce} com melhoramento por cimento CP V ARI RS. Consoli *et al.* (2012b) compararam a relação G_o/q_u em função da razão η/C_{iv} nas areias de Osório/RS e de Porto Alegre/RS, ambas artificialmente cimentadas, concluindo ser uma boa forma para analisar varias matrizes de solos.

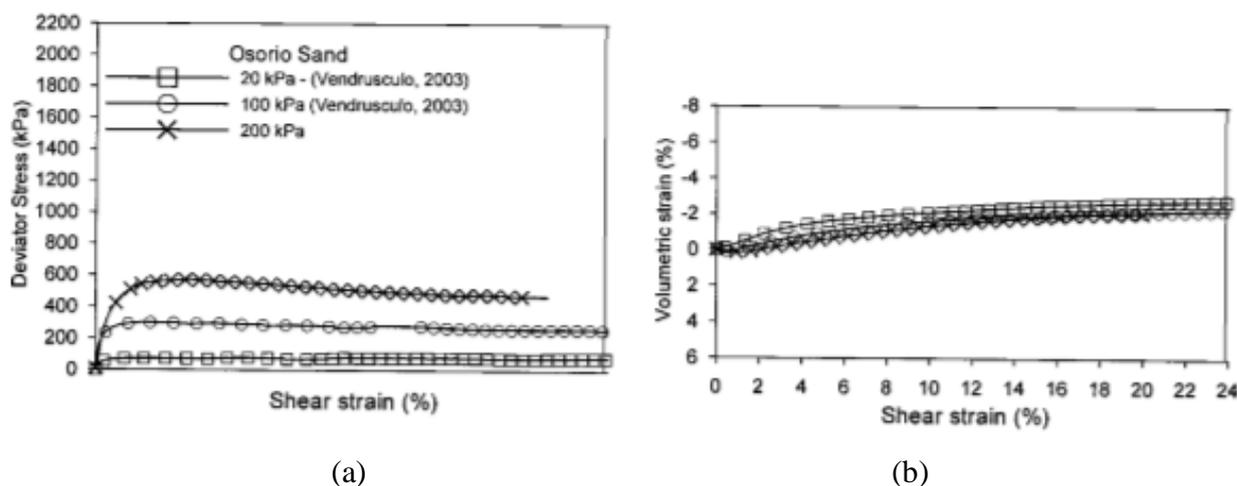


Figura 83 – Comportamento da areia de Osório/RS no ensaio triaxial CID: a) tensão desviadora vs deformação cisalhante; b) deformação volumétrica vs deformação cisalhante. (Fonte: Heineck *et al.*, 2005)

4.3 ÁGUA POTÁVEL

Em função de ser um experimento, a mistura de materiais para a produção das camadas de solo melhorado com o cimento, será realizada com utilização de água diretamente da rede de abastecimento público.

5 MÉTODOS

Neste tópico será descrito todos os procedimentos ocorridos durante a pesquisa. Inicialmente, houve uma avaliação do enquadramento da pesquisa. Em seguida foi explicado como foi projetado e verificado numericamente o gatilho (*trigger*), como também explanado o conceito e o projeto do inclinômetro experimental UFRGS. Posteriormente foi explicitada toda a sequência de ensaios de campo, desde a etapa de melhoramento mecânico do solo através da compactação dinâmica, como também a realização das camadas melhoradas e procedimentos da avaliação da eficiência da melhoria através de ensaio.

5.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA

De um modo geral, este trabalho possui uma abordagem quantitativa com natureza de pesquisa aplicada. Segundo Gerhardt e Silveira (2009), pesquisas de natureza aplicada visam “gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos”. É de caráter da abordagem quantitativa “testar teorias objetivas, examinando a relação entre as variáveis. Tais variáveis, por sua vez, podem ser medidas tipicamente por instrumentos, para que os dados numéricos possam ser analisados por procedimentos estatísticos”, segundo Creswell (2010).

No que tange a classificação da pesquisa com base no objetivo geral proposto, este trabalho enquadra-se como pesquisa explicativa, pois segundo Gil (2002) as pesquisas explicativas têm como enfoque “identificar fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência de fenômenos” de forma que nas ciências naturais “valem-se exclusivamente do método experimental”. Nas pesquisas experimentais baseia-se “procedimento disponível aos cientistas para testar hipóteses que estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis”.

O delineamento da pesquisa seguiu duas vertentes no trabalho em questão, sendo inicialmente uma pesquisa bibliográfica pautada no levantamento de informações a respeito da compactação dinâmica, melhoramento de solo com cimento e equipamento inclinômetro através de fonte bibliográficas como artigos, manuais, normas, livros, dissertações, teses e outros. Quanto ao ensaio em campo, o melhoramento do solo através de técnicas mecânica e químicas (substituição dinâmica com adição da camada melhorada) foi observado em função do efeito da variação da espessura da camada melhorada (H_{cam}) e profundidade de coluna granular compactada (L) em função do volume de solo granular compactado introduzido, baseado em Gil (2002).

Em relação ao desenvolvimento do gatilho (*trigger*) pode-se afirmar que assim como os outros é de natureza aplicada e abordagem mista, uma vez que foram desenvolvidos para atendimento de necessidades práticas da engenharia geotécnica, além de ser experimental devido a manipulação das variáveis de entrada, tais como esforço (carregamento sofrido pelo gatilho) e dimensões geométricas, possibilitarem o desenvolvimento do objeto (produto).

Por fim o desenvolvimento do equipamento inclinômetro da pesquisa possui uma natureza aplicada e abordagem mista uma vez que foi desenvolvido para atender às necessidades práticas, como também o tipo de material e dimensões foram escolhidos com o objetivo de ser durável e registrar a maior quantidade de pontos possíveis de forma que os dados coletados, uma vez comparados a um inclinômetro comercial comum, possam ser validados.

5.2 CONCEPÇÃO DO GATILHO (*TRIGGER*)

Para realização dos ensaios de compactação dinâmica no campo experimental da Universidade de Passo Fundo – RS foi necessário a construção de um gatilho (ver a Figura 84) para desengate do peso em altura. O sistema do gatilho proposto é composto por um corpo e uma alavanca de liberação, sendo o corpo formado pelo corpo fixo, corpo móvel e uma trava (ver os detalhes da peça no Apêndice B) constituído também por elementos complementares como manilhas e cintas que fazem a conexão entre o gatilho e um guindaste e ponto de engate do martelo de compactação semelhante ao apresentado em Giese (2019).

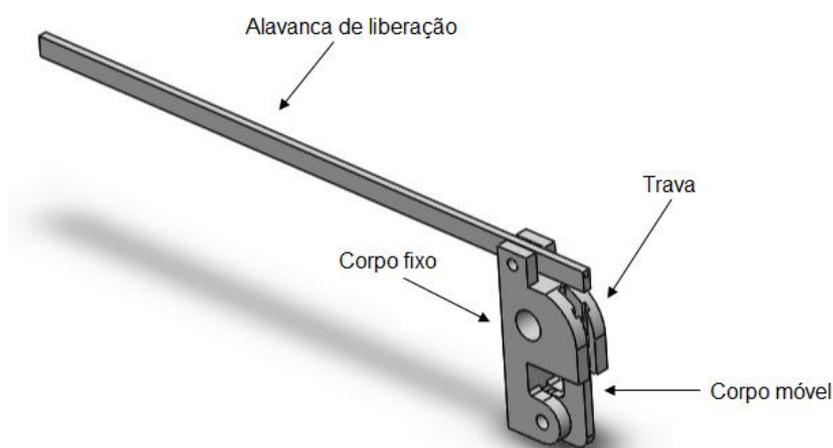


Figura 84 – Ilustração do conjunto gatilho da pesquisa. (Fonte: Própria , 2019)

O funcionamento do gatilho baseia-se no princípio do momento, onde o martelo uma vez içado até a cota necessária (depende da energia de queda) é liberado através do soerguimento

da trava acoplada à alavanca de liberação que tem a função de impedir o corpo móvel de tombar. O tombamento do corpo móvel possibilita que a manilha presa ao martelo seja liberada em queda livre. O momento (ou torque) é produzido por uma força na extremidade da alavanca, sendo esta força oriunda do esforço de tração no fio preso a sua extremidade acionado pelo operador.

O corpo do gatilho (*trigger*) foi projetado com aço SAE 4140, que é um aço composto por liga cromo/molibdênio e apresenta elevada resistência mecânica, rigidez, resistência a fadiga, impacto e abrasão. Já a alavanca de liberação do martelo foi projetada com SAE 1020 que é um aço carbono constituído basicamente de ferro, carbono, silício e manganês com propriedades mecânicas inferiores comparadas ao aço SAE 4140, uma vez que este elemento do conjunto não será submetido a esforços elevados. As composições químicas destes materiais estão descritas na Tabela 19 segundo a NBR NM 87(2000), e as propriedades mecânicas destes materiais estão descritas na Tabela 20.

Tabela 19 – Composição química dos aços utilizados no gatilho. (Fonte: NBR NM 87, 2000)

Aço	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
SAE 1020	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	---	---	---	0,040 _(máx)	0,050 _(máx)
SAE 4140	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,15-0,35	0,80-1,10	0,15-0,25	---	---

O gatilho foi modelado com auxílio de um *software Solidworks®* versão 2016 com base no método dos elementos finitos utilizando uma malha padrão mista, composta por 4 pontos jacobianos e foi realizado um teste de convergência de malha baseado em 5 avaliações (ver a Figura 87a). O modelo constitutivo plástico de *Von Mises*, que é apropriado para descrição de comportamento de materiais dúcteis como é caso dos metais, segundo Chen e Han (1988). No modelo constitutivo plástico de *Von Mises*, segundo Chen e Han (1988) e Chen e Zhang (1991) tem como premissas:

- a) O critério de *Von Mises* afirma que a plastificação de um material ocorreria quando a energia máxima de deformação de cisalhamento em um ponto do material atingisse um valor crítico, sendo a energia de deformação de cisalhamento proporcional à segunda variante do tensor de tensão;
- b) É feita uma pressuposição de regra de fluxo associado (fluxo de plástico está conectado ou associado ao critério de rendimento);

- c) As regras de endurecimento isotrópico e cinemático são válidas, uma vez que a regra de fluxo associada é válida para materiais plásticos irreversíveis;
- d) Em problemas de grande fluxo de plástico, a tensão elástica pode ser negligenciada e assim o material pode ser idealizado como rígido e perfeitamente plástico.

Tabela 20 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados na concepção do gatilho. (Fonte: Solidworks,2017)

Propriedades	Unidade	Tipo de aço	
		SAE 4140	SAE 1020
Módulo de elasticidade	GPa	209	211
Coefficiente de Poisson	---	0,32	0,29
Módulo de cisalhamento	GPa	81,57	77
Massa específica	Kg/m ³	7850	7900
Resistência à tração	MPa	1132	420
Limite de escoamento	MPa	724	351,57

Para atestar a qualidade do aço do corpo do gatilho (SAE 4140) foi solicitado do fabricante um conjunto amostral de 10 corpos de prova, sendo cinco corpos de prova de tração, seguindo os procedimentos da NBR 6892 (2015), e cinco corpos de prova para ensaio de impacto *Charpy* que segue as especificações da ASTM E-23 (2018), conforme a Figura 85.

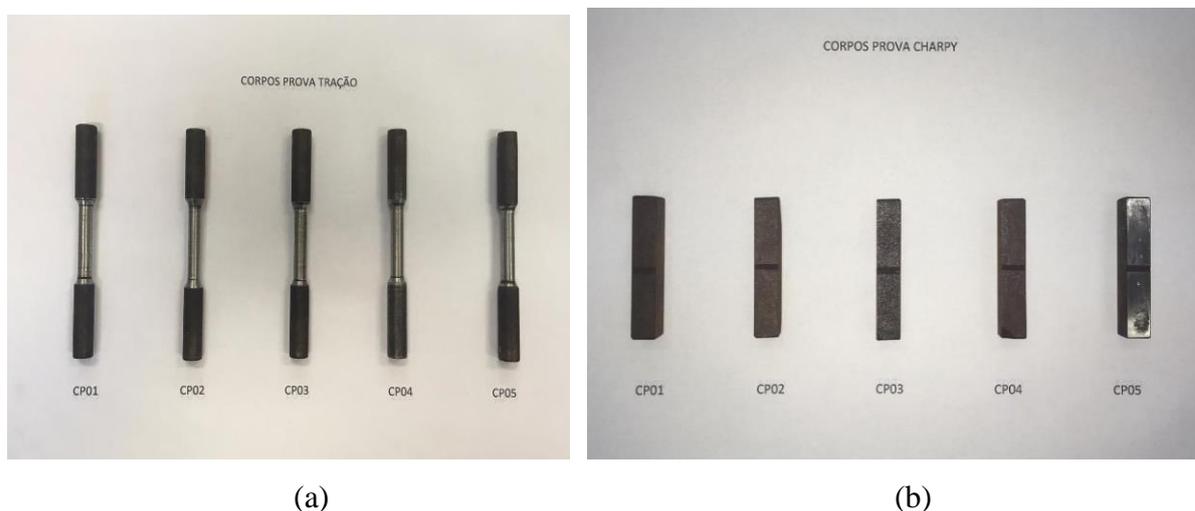


Figura 85 – Corpos de prova do Aço SAE 4140: a) Corpos de prova de ensaio de tração direta; b) Corpos de prova de ensaio de resistência ao impacto. (Fonte: Própria, 2019)

Em caráter complementar, foram realizados cinco ensaios de dureza em um corpo de prova do ensaio de resistência ao impacto (ver o CP 5 na Figura 85) baseado na NBR NM ISO 6508-1 (2019) e ASTM E-18 (2019). A Figura 86 ilustra os equipamentos utilizados para atestar a

qualidade do aço usado na composição do corpo gatilho. Conforme ilustrado, na Figura 86a apresenta a prensa eletrônica utilizada no ensaio de tração direta modelo *AGX Plus* com capacidade 250 kN do fabricante *Shimadzu*®.

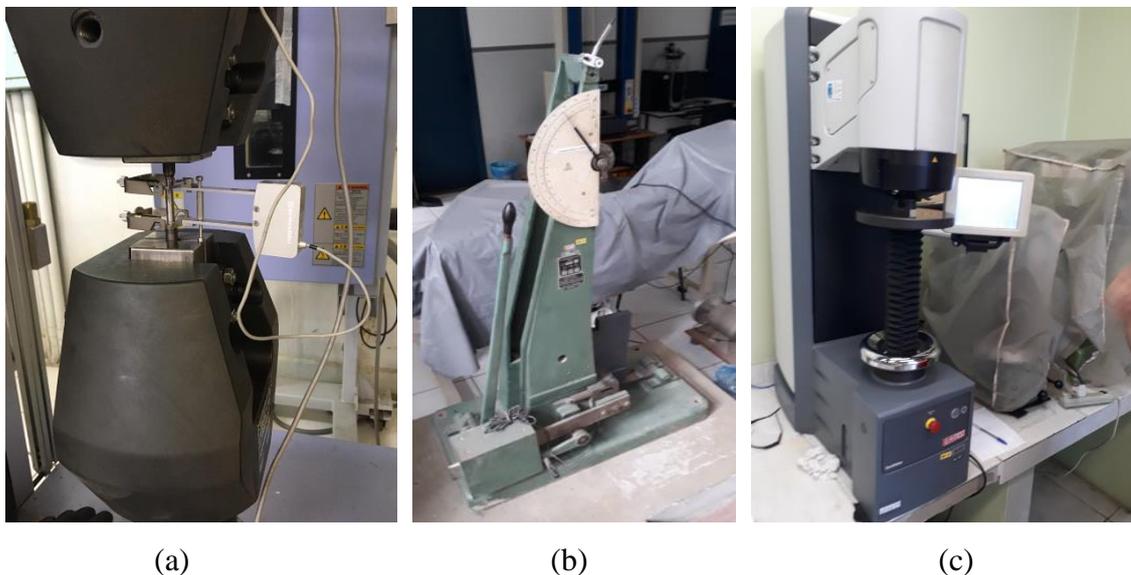


Figura 86 – Equipamentos utilizados para realização dos ensaios: a) prensa eletrônica de ensaio de tração direta; b) equipamento de ensaio de impacto; c) equipamento de ensaio de dureza. (Fonte: Própria, 2019)

A Figura 86b ilustra o equipamento usado para ensaio *Charpy* com martelo de 30 kpm (com massa de 18,750 kg e com comprimento de braço de rotação de 825 mm) do fabricante alemão *Ver Werkstoffprüfmaschinen Leipzig*®. Por fim, a Figura 86c apresenta o Durômetro Digital modelo *Duravision 30* do fabricante *EMCO TEST*® com opção de ensaio *Rockwell C* com carga de 150 kgf.

Em termos de carregamento imposto no gatilho foi admitido uma carga estática de 70 kN, o que corresponde hipoteticamente ao esforço estático de retirada do martelo da cratera, ou seja, o somatório do carregamento do peso do martelo de compactação, adesão de base do martelo e o atrito da base do martelo. Para tanto, foi modelado o gatilho com o acoplamento do cilindro apoiado numa delimitada região do corpo móvel da peça (simula a manilha apoiada na peça), conforme ilustrado na Figura 87a e b.

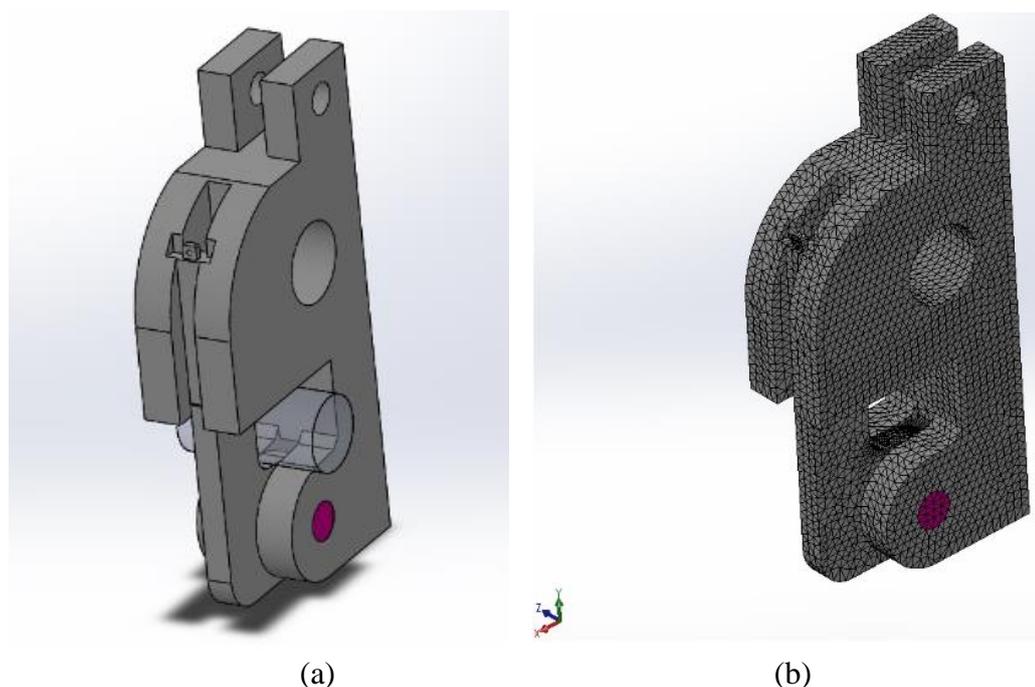


Figura 87 – Modelagem computacional do gatilho (*trigger*): a) imagem em 3D do modelo (*trigger* e manilha); b) Malha adotada (MEF) no corpo do gatilho. (Fonte: Própria, 2019)

Ao realizar o teste de convergência numérica da malha no gatilho foi percebido que a adoção de uma malha com 7 mm no corpo do gatilho e refinamento na região de apoio da malha com elemento de tamanho característico de 5 mm já seria suficiente para a realização de uma simulação consistente, uma vez o impacto na simulação seria inferior a 1% no resultado final, conforme Tabela 21.

Tabela 21 – Teste de convergência da malha no gatilho. (Fonte: Própria, 2019)

Tamanho característico do elemento (mm)		$\delta_{\text{máx}}$ (mm)
corpo do gatilho	Região de apoio da manilha	
14	---	0,0461
14	7	0,0466
7	5	0,0473
5	3	0,0475
5	2	0,0476

Adotando o cenário com tamanho característico do elemento com 5 mm no corpo e de 2mm na região de maior concentração de tensões foram feitas as análises numéricas. Quanto a avaliação de tensão vs deformação em regime elástico do corpo do gatilho (corpo fixo com o corpo móvel travado) após simulação numérica foi percebido que o corpo fixo apresentou

pequenas deformações (máxima de 0,154%) e tensões máximas de 370,11 MPa concentradas na região limite entre o corpo móvel e o corpo fixo (ver a Figura 88).

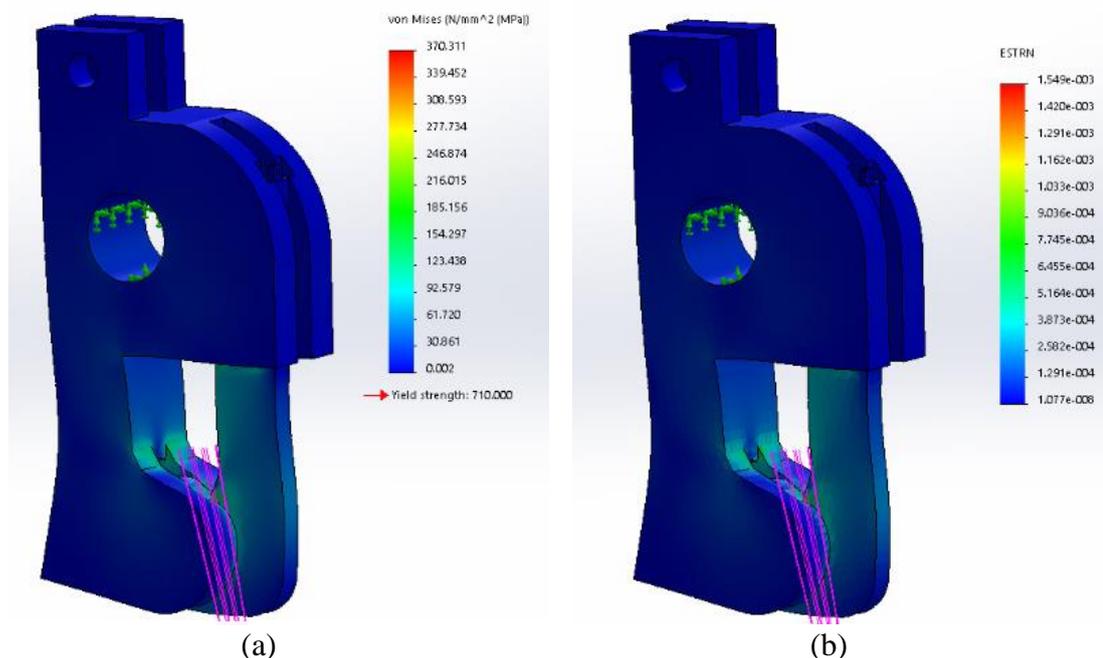


Figura 88 – Simulação numérica do gatilho (*trigger*): a) avaliação de tensão no corpo; b) avaliação deformação do corpo. (Fonte: Própria, 2019)

A ocorrência disto deve-se a excentricidade do orifício de içamento (abertura superior) e do ponto de acoplamento do peso (região de apoio da manilha com o martelo de compactação), sendo a posição de equilíbrio do gatilho carregado representada por uma leve rotação no sentido da abertura do corpo móvel, concentrando tensões elevadas nesta região. Este excentricidade permite que o peso seja liberado mais facilmente no momento da abertura do dispositivo.

Além disso, na simulação numérica foi obtido um deslocamento máximo de 0,0476 mm, entretanto, no corpo, os deslocamentos variaram na faixa de 0,0198 mm e 0,357 mm, conforme ilustrado na Figura 89a. Para determinação do fator de projeto foi usada a norma ASME BTH-1-2008. Segundo ASME (2008), situações as quais não há previsão da magnitude e a variação das cargas e quanto às condições forem consideradas severas ou não definidas com precisão utiliza-se a categoria B. Nesta categoria os dispositivos de elevação não devem ser inferiores a 3,00 para estados limites de cedência ou flambagem e 3,60 para estados limites de fratura e para projeto de conexão.

Ao realizar a simulação numérica o valor do $F_{s_{min}}$ foi igual a 1,917, tendo em vista que as concentrações que ocasionaram a redução do $F_{s_{min}}$ foram pontuais, pode-se considerar que

de uma forma geral o fator de segurança de projeto da peça foi igual 3,938 (plastificação concentrada numa área reduzida como pode ser visto na Figura 89b).

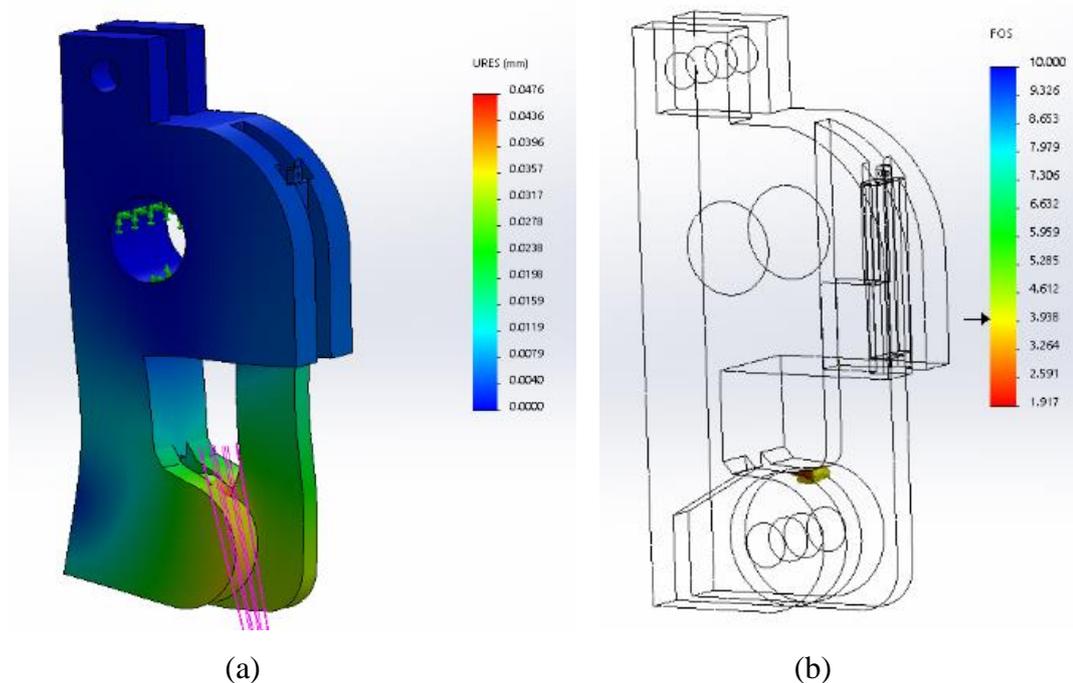


Figura 89 – Simulação numérica do gatilho: a) avaliação de deslocamento; b) avaliação do FS. (Fonte: Própria, 2019)

Para validar e verificar se o gatilho modelado no software *Solidworks*® versão 2017 estava coerente com os esforços mecânicos que ocorrerão em campo, foi realizado um ensaio de tração no laboratório. No corpo fixo da peça foi instalado um extensômetro colável de resistência elétrica (modelo roseta dupla a 90° com grelhas lado a lado), denominado de *strain gauge* (ver a Figura 90), modelo PA 09 060TG 350L com suas respectivas medidas.

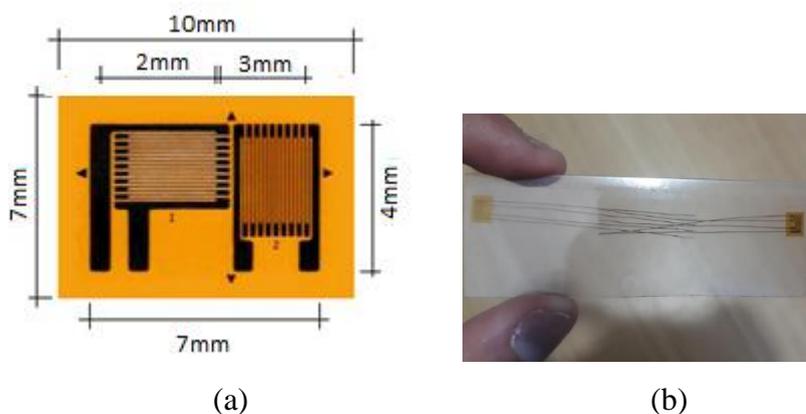


Figura 90 – Extensômetros coláveis de resistência elétrica (modelo roseta dupla a 90°): a) desenho esquemático; b) extensômetro PA 09 060TG 350 L. (Fonte: Própria, 2019)

Na prensa automatizada ilustrada na Figura 86 foi acoplado o gatilho conjuntamente com as duas manilhas, de forma que cada manilha era presa por um laço de cabo de aço que por sua vez eram fixados nas garras da prensa, conforme Figura 91a. As medidas de deformação eram avaliadas durante a aplicação do carregamento monotônico, através de um extensômetro de resistência elétrica (ver a Figura 91b e c) que ficava localizado na face do corpo fixo de maior concentração de tensões da peça, baseado na resposta da modelagem numérica.

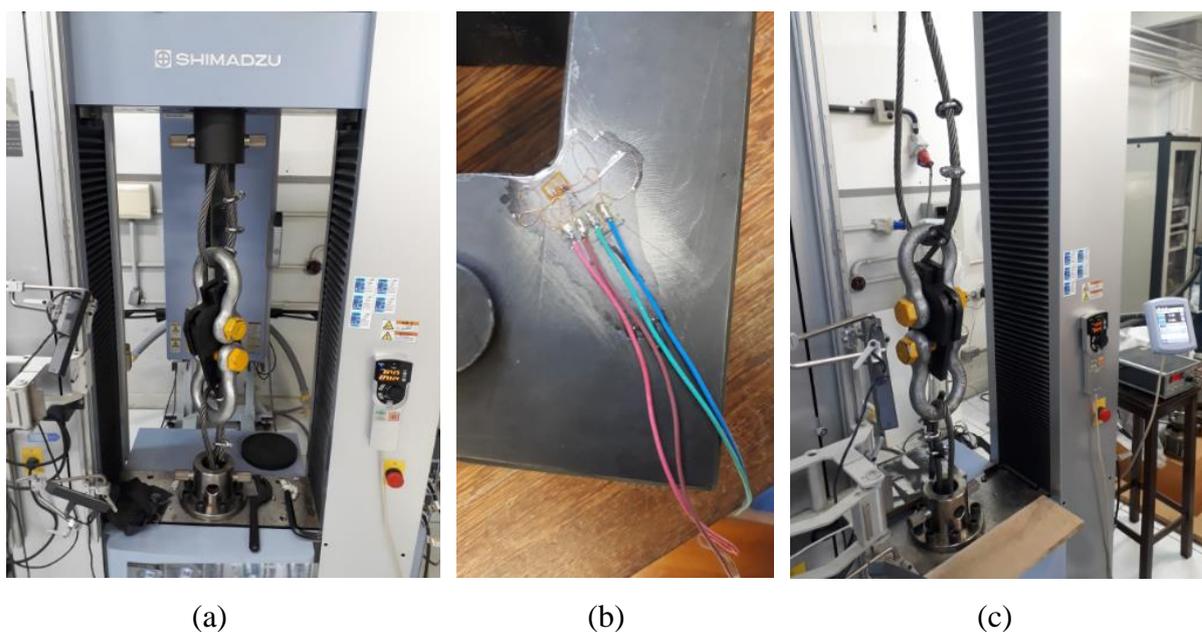


Figura 91 – Ensaio de tração direta: a) corpo do gatilho fixado na prensa; b) instalação do extensômetro (*Strain Gauge*) no corpo do gatilho; c) ensaio montado para leitura de deformação no gatilho. (Fonte: Própria, 2019)

5.3 CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DO INCLINÔMETRO EXPERIMENTAL

O projeto de desenvolvimento do inclinômetro foi concebido com base nas premissas de que o sistema deveria possuir: dimensões geométricas reduzidas comparadas às medidas fornecidas por inclinômetros comerciais, embora possua seção transversal variável; leituras em duas direções ortogonais instantâneas conforme avanço em profundidade; e baixo custo. Além disso, as leituras precisariam ser realizadas com auxílio de poucos equipamentos, ou seja, um *notebook* pessoal. O propósito inicial do trabalho foi desenvolver a sonda inclinométrica para realizar as leituras de deslocamento horizontais gerados pela compactação dinâmica juntamente com a introdução do material de preenchimento, porém não foi possível em função das dificuldades enfrentadas no seu desenvolvimento e do cronograma físico da pesquisa.

5.3.1 Inclinação MEMS

Dentre as opções de tecnologias disponíveis no mercado optou-se pela utilização de acelerômetros *MEMS*. Na pesquisa em questão, dentre os acelerômetros *MEMS* ofertados no mercado de eletrônicos, foi escolhido o SCA 103T D04-1, que segundo Murata (2019), pertence a série SCA 103T do fabricante *Murata*®, cujos parâmetros estão elencados na Tabela 22, além disso possui como atributos: alta precisão de calibração, alta resolução e baixo ruído.

Tabela 22 – Parâmetros do acelerômetro *MEMS* modelo SCA 103T D04-1. (Fonte: Murata, 2019)

Parâmetros	Unid.	Valores
Intervalo de medição	°	±15
Força	G	±0,26
Sensibilidade analógica gravitacional	V/g	16
Sensibilidade analógica angular	mV/°	280
Resolução digital	°/LSB	0,009
Resolução analógica	°	0.0013
Temperatura de operação	°C	-40 – 125
Não linearidade típica	°	±0,057
Corrente de consumo típica	mA	4 (5*)
Tensão de alimentação Vdd	V	4,75 – 5,25 (5**)

*O valor de corrente de consumo máximo é de 5mA;

** O valor típico da tensão de alimentação é de 5V.

A faixa de tensão da fonte deve enquadrar-se entre -0,3V e 5,5V. O inclinômetro *MEMS* SCA 103T D04-1 não é sensível à vibração devido à existência de elementos sensoriais mais amortecidos e que podem suportar choques mecânicos de 20000 g. Em termos de aplicações, pode ser utilizado para procedimentos de nivelamento e estabilização de plataforma, níveis de laser rotativos, instrumentos de nivelamento, nível de construção e outros.

O ângulo máximo de rotação que pode ser medido pelo SCA 103T D04 -1 corresponde ao valor de 17,86° baseado no cálculo da razão entre tensão de alimentação de (5 V) e a sensibilidade analógica angular (280 mV/°), ou seja, aproximadamente 19,07% superior ao estipulado, como faixa de segurança para garantia de limite comercial.

A ligação elétrica do acelerômetro para medidas de inclinação é realizada utilizando os pinos 5 (OUT_2) e 11 (OUT_1), conforme a Figura 92a. A Figura 92b ilustra o comportamento típico das saídas (canais 1, 2 e saída diferencial: OUT_1-OUT_2). A Figura 92b encontra-se ilustrado graficamente o que ocorre na Figura 93, de forma que os ângulos de rotação são

calculados em função da resposta elétrica das saídas. Quando há rotação para a esquerda a tensão na saída OUT_2 responde com valor positivo e com valor nulo ou levemente positivo na saída OUT_1, obtendo assim um diferencial de saída negativo. A posição neutra (0° de rotação) é lido com um valor nulo no diferencial de saída, uma vez que ambos os canais possuem a mesma tensão de saída. Quanto a rotação à direita, a tensão na saída OUT_2 é nula ou um pouco maior com valor positivo na saída OUT_1, obtendo assim um diferencial de saída positivo. Ele possui um sensor interno (uma espécie de termopar) que captura a variação de temperatura e corrige a leitura digital por meio de um algoritmo interno.

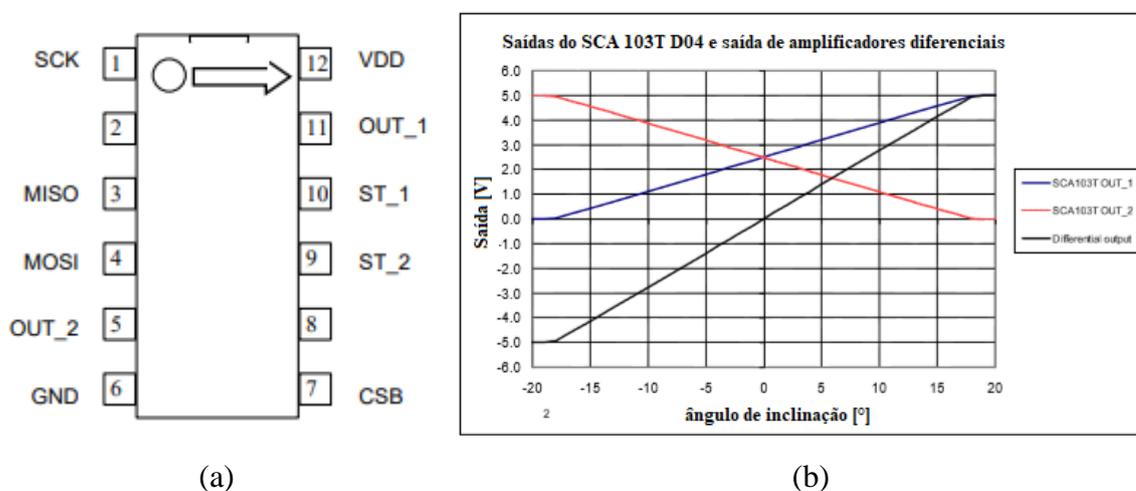


Figura 92 – Conexão elétrica do acelerômetro *MEMS* modelo *SCA 103T D04-1*: (a) esquema do circuito; (b) comportamento das saídas. (Fonte: Murata, 2019)

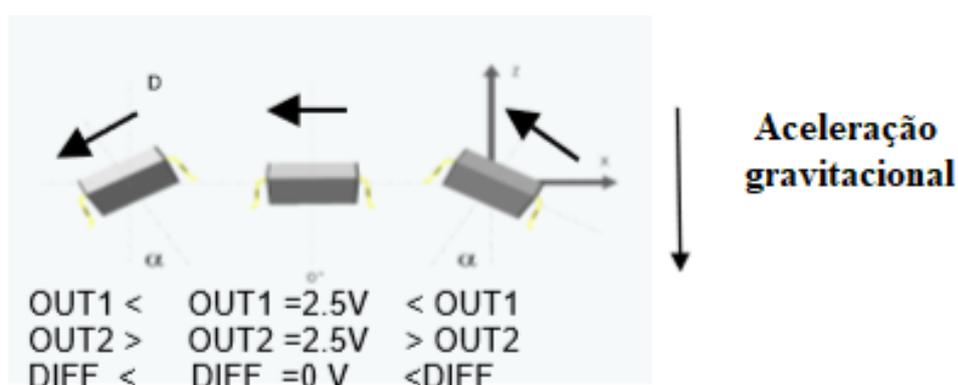


Figura 93 – Comportamento da saída analógica do *SCA 103T D04-1*. (Fonte: Murata, 2019)

Com isso, de acordo com Murata (2019), o valor da tensão medida na saída analógica ou digital pode ser convertido em um ângulo de inclinação do acelerômetro *MEMS* (α), que em termos da sonda, representa o ângulo de rotação do corpo, conforme equação (60):

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{V_{Dout-Offset}}{Sensitivity}\right) \quad (60)$$

Recomenda-se que o valor da saída de *Offset* nominal seja igual a 0 V e o da sensibilidade é 16 V/g. Ângulos próximos a 0° de inclinação podem ser estimados com precisão com conversão de linha reta, mas para melhor precisão possível o mais indicado é a conversão com arco-seno. O valor de sensibilidade do sensor (v/g) é calculada seguindo a equação 61, considerando a posição do sensor, assim como da tensão elétrica de saída.

$$Sensitivity = \frac{(V_{out_{tilt\ 1}} - V_{out_{tilt\ 2}})}{Sen(tilt\ 1) + Sen(tilt\ 2)} \quad (61)$$

5.3.2 Estrutura da sonda inclinométrica

A Figura 94 ilustra o corpo da sonda inclinométrica após a usinagem de precisão. O detalhamento da sonda inclinométrica anunciando as dimensões geométricas das peças estão informados e ilustrados no Apêndice A.

O material escolhido para construção do corpo da sonda foi o aço inox 304 e 316 (na câmara). Segundo Carbó (2008), os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr), cujo teor mínimo de Cr é igual a 10,50%, o que garante a resistência à corrosão. Quando há adição de níquel como elemento de liga, em determinadas proporções, há transformação da estrutura ferrítica para austenítica, composição esta representativa do aço inox 304.

Os aços inoxidáveis 304 possuem as faixas teores e elementos descritos 18% Cr e 8% Ni, sendo o mais popular da série, em função da excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade (existe aqui uma grande mudança nas propriedades mecânicas se os comparamos com os ferríticos) e excelente soldabilidade. Entretanto, o mesmo aço enfrenta problemas quanto à ação corrosiva provocada pelo ânion cloreto (Cl⁻). Dependendo da concentração de cloretos no meio de exposição, da temperatura e do pH, três formas de corrosão podem ocorrer, sendo elas: por pites, por frestas e/ou sob tensão. Além disso, o aço inox 304 e 316, por serem austeníticos, não são magnéticos e logo adequados em equipamentos eletrônicos.

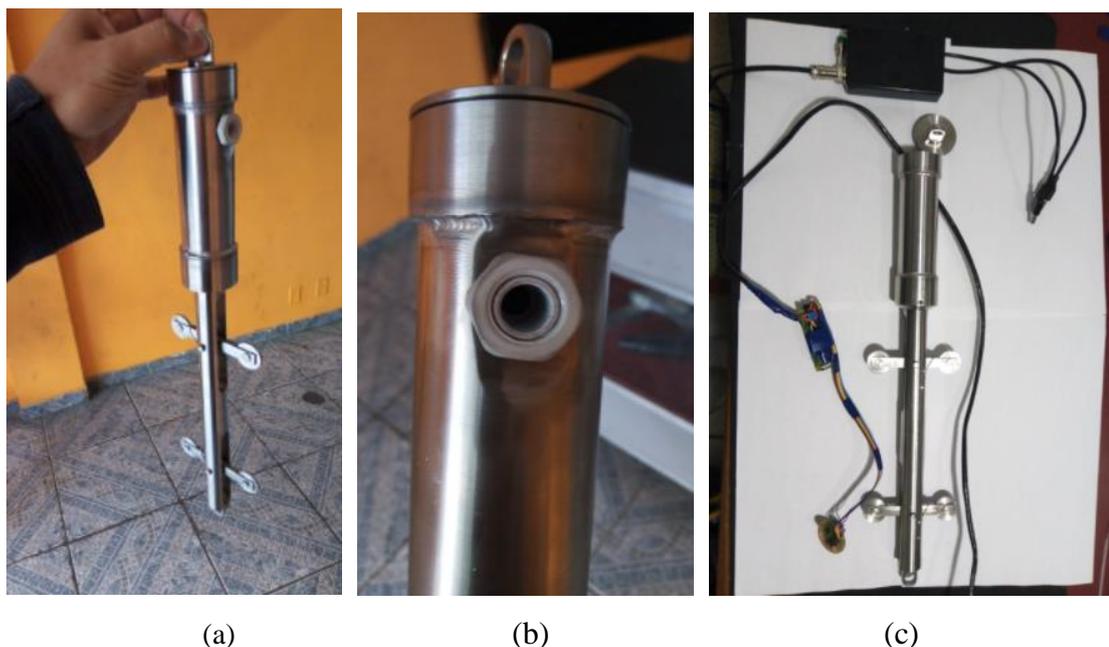


Figura 94 – Corpo da sonda inclinômetrica: a) detalhe das peças usinadas já soldadas; b) detalhe do prensa cabo para passagem do cabo de alimentação e leitura; c) Sonda inclinométrica com o circuito eletrônico e adaptador *USB* para acesso em *notebook*. (Fonte: Própria, 2021)

Sabendo a distância entre eixos do inclinômetro experimental proposto, torna-se possível calcular a resolução do mesmo considerando a resolução do canal digital do inclinômetro, conforme Penz (2013). De posse da equação (62) foi obtido um valor de resolução do equipamento igual a 0,023 mm.

$$\lambda_{in} = L_{eixos} \times \text{sen } \beta_{in} \quad (62)$$

Para o cálculo do deslocamento em uma cota específica do posicionamento do inclinômetro recorre-se a equação (63) que é expressa aos mesmos moldes da equação (62).

$$\Delta_H = L_{eixos} \times \text{sen } \alpha \quad (63)$$

5.3.3 Componentes eletrônicos usados na aquisição e transferência de dados

A aquisição de dados de medição foi realizada através de um computador em placa do fabricante *Raspberry Pi*® modelo *Raspberry Pi zero* ilustrado na Figura 95. Segundo Adafruit (2019), este computador possui dimensões de 65 mm de comprimento, 30 mm de largura e 5

mm de espessura e é constituído por componentes eletrônicos de baixo custo. O corpo da placa é formado por um processador (*CPU*) *ARM Single-core* de 1 *GHz* (similar ao dos modelos *Pi Model B+* e *A+*) conjuntamente a uma memória *RAM* de 512 MB. A placa dispõe de porta mini *HDMI* (pode obter saída *PAL* ou *NTSC* através de dois *pads* de 0,1"), porta Micro *USB OTG*, potência Micro *USB*, cabeçalho de 40 pinos compatível com *HAT*.

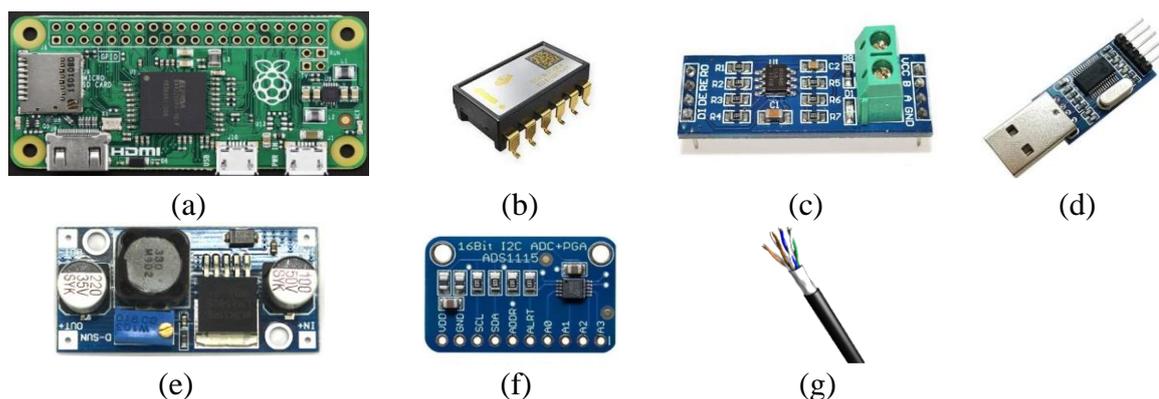


Figura 95 – Componentes eletrônicos do inclinômetro: a) Placa *Raspberry Pi zero W*; b) Sensor inclinômetro *MEMS SCA 103T D04-1*; c) Módulo *RS-485*; (d) Módulo *USB-TTL*; (e) Regulador de tensão; (f) Módulo *ADS-1115*; g) Cabo de comunicação. (Fonte: Própria, 2021)

De forma complementar, utilizou-se um módulo de baixo custo capaz de estabelecer uma comunicação diferencial no padrão *RS-485* (ver a Figura 95c). A tensão de operação empregada foi de 3,3 V tendo em vista que este é o mesmo valor aplicado a todos os outros dispositivos. Segundo especificações do fabricante, seu consumo de energia é de 300 μA .

A comunicação a longa distância se estabelece por meio do cabo de rede blindado no padrão *Cat5e*, (ver a Figura 95g). Seus condutores são compostos por 4 pares de fios de cobre entrelaçados, cobertos individualmente por uma proteção termoplástico. Além disso, empregou-se o módulo *USB-TTL* (ver a Figura 95d), para conversão entre o padrão de comunicação empregado nos microcontroladores (*UART* ou *TTL*) e aquele empregado nas portas *USB* (*RS-232*, *Recommended Standard 232*). Este módulo utiliza o *chip* *PL-2303*, produzido pela empresa *Prolific*, que requer uma corrente contínua de 24 mA.

Com o intuito de ajustar a tensão fornecida pela porta *USB* ao nível de entrada solicitado pelos dispositivos (5V), empregou-se o regulador de tensão *Step up* *XL6009E1* (ver a Figura 95e). A razão da escolha desse tipo de regulador se dá pelo seu alto índice de eficiência operacional em comparação com outros métodos. De acordo com especificações técnicas, seu funcionamento requer 5mA. Por fim, em função de adequações ao projeto inicial, aplicou-se

um conversor analógico digital *ADS-1115* (ver a Figura 95f) à saída analógica do sensor com resolução de 16 *bits*.

5.3.4 Circuito eletrônico desenvolvido

O circuito eletrônico do inclinômetro apresenta a configuração dos seus componentes montados segundo a Figura 96, cujos componentes encontram-se sumarizados na Tabela 23. O circuito eletrônico funciona inicialmente pelos sensores *MEMS*, que mensuram continuamente a inclinação com base na aceleração gravitacional e os transformam em dados (ver a Figura 93). Estes dados são convertidos em leituras digitais e enviados por comunicação *SPI* a placa *Raspberry Pi 0 W*. A placa por sua vez recebe os dados emitidos pelos sensores e os envia via porta serial com auxílio de um algoritmo desenvolvido em linguagem *Python*.

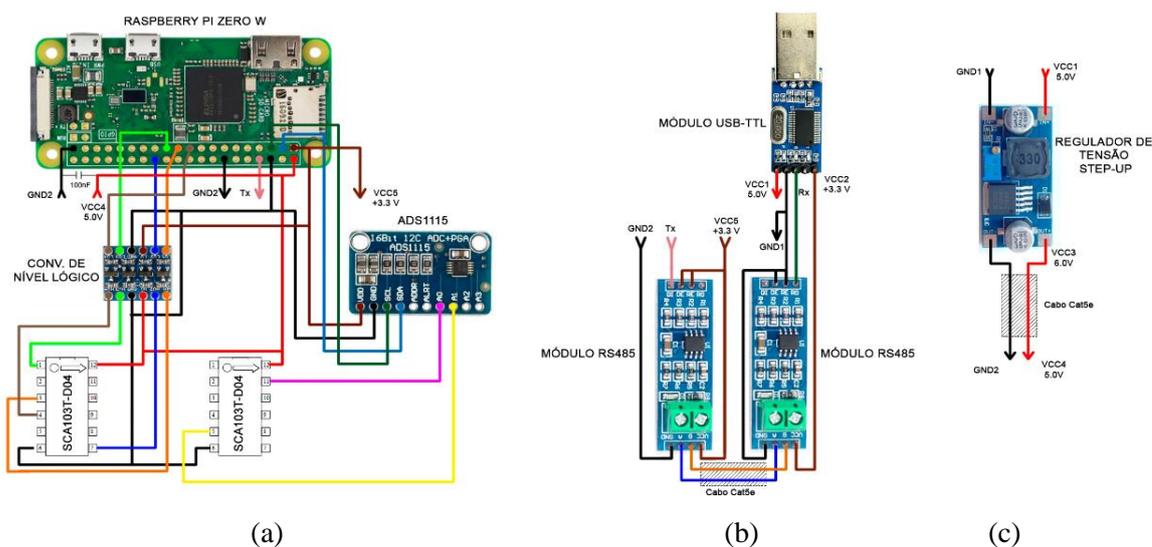


Figura 96 – Diagramação do circuito elétrico do inclinômetro: a) detalhe do circuito principal; b) circuito secundário para conectar circuito principal com o *notebook*; c) detalhe do regulador de tensão *Step-Up*. (Fonte: Própria, 2021)

Como a leitura na placa *Raspberry Pi 0 W* ocorre a partir de tensões de 3,3 V, foi introduzido um conversor de nível de lógico bidirecional (*Step-up* de 3,3 V para 5V e *Step-down* 5V para 3,3V) com 4 canais *HV* e saídas *LV* ligadas ao barramento da placa para realização da comunicação placa/sensor, pode ser visto na Figura 96a.

Como o sinal é emitido por cabo, à longas distâncias, ocorre queda de tensão na porta USB. Com intuito de mitigar este efeito foi usado um regulador de tensão *Step-Up*, com isso a tensão do sensor recebida na saída de 5 V do *notebook* e devolvida em 6 V e após percorrer o todo

cabo do equipamento chega no microcontrolador com 5 V, conforme a Figura 96c. Além desse, foram introduzidos dois módulos RS-485 para criar um padrão de emissão de sinal que possibilitasse uma comunicação à longa distância (ver a Figura 96b), sendo a comunicação entre a sonda e o notebook permitida por meio do conversor *TTL-USB*. A mesma entrada *USB* fornece energia pela fonte (*Notebook*) para placa e para os respectivos sensores.

Para realizar as medições e obter o gráfico de deslocamento deve-se seguir uma rotina sequenciada de procedimentos, que são:

- 1) Abre o arquivo de rotina *inclinometro.py*;
- 2) Informa a porta *COM* (ver na seção de gerenciador de dispositivos no computador) ativa pela entrada *USB* através do cabo de leitura na sonda inclinométrica e pressiona a tecla enter (ver a Figura 97);
- 3) Informa o valor serial no programa (9600) e pressiona a tecla enter (ver a Figura 97);
- 4) Posiciona o inclinômetro na profundidade de leitura;
- 5) Aperta o botão “y” na pergunta “Deseja coletar a leitura? [y,n]” e uma vez estabilizada a sonda pelas últimas 50 leituras, o valor da leitura digital é informado (ver a Figura 97);
- 6) A resposta da leitura digital é convertida em um valor de ângulo de inclinação α em função da equação de calibração do sensor que considera os parâmetros de *offset* do sensor e a sensibilidade (ver a equação 56) para calcular o valor do deslocamento na cota específica com base na equação (63);
- 7) No decorrer da rotina cíclica da programação em *Python*, com auxílio da placa *Raspberry Pi 0 W*, ocorre a transferência de dados ao computador via cabo;
- 8) Feita a medição, reposiciona-se o equipamento na profundidade seguinte e todo o procedimento é repetido;
- 9) Ao realizar todas as leituras em relação a um eixo (X ou Y), o sensor é rotacionado 180° em relação ao próprio eixo e todo o procedimento é repetido;
- 10) Ao fim de todas as medidas do respectivo eixo, o deslocamento médio da sonda é calculado em relação a profundidade;
- 11) Calcula-se o deslocamento médio acumulado a partir do somatório dos deslocamentos médios em cada cota medida com base na equação (63);
- 12) Repete-se todos estes procedimentos na posição da ranhura ortogonal do tubo-guia e assim se obtém a curva de deslocamento nos eixos X e Y.

Obs: Ao finalizar o procedimento de leitura, digita “n” e finaliza o programa.

```

C:\Users\tenni\Desktop\Inclinometro\inclinometer.exe
Especifique a porta serial utilizada para comunicação (ex. COM10)
COM3
Especifique o baudrate utilizado para comunicação (ex. 9600)
9600
Porta serial aberta COM3 a um Baudrate de 9600
Deseja coletar leitura? [y,n]
y
Sensor 1 (330.18,)
Sensor 2 (-19941.0,)
Deseja coletar outra leitura? [y,n]

```

Figura 97 – Programa inclinômetro. py em funcionamento. (Fonte: Própria, 2021)

Tabela 23 – Componentes do inclinômetro experimental proposto. (Fonte: Própria, 2021)

Item	unid	Qtde
Corpo da sonda inclinométrica - Inox 304	unid	1
Carcaça da unidade de leitura - Inox 316	unid	1
Base (impressão 3D) - ABS	unid	1
Acelerômetro <i>MEMS SCA 103T D04-1</i>	unid	2
Módulo conversor Analógico/Digital - <i>ADS 1115</i> (4 canais)	unid	1
Módulo <i>RS-485</i>	unid	2
Caixa plástica (100mm x 60mm x 25 mm)	unid	1
Conversor <i>TTL-USB</i>	unid	1
Conversor de nível lógico	unid	1
Conector <i>Mike 5</i> pinos <i>PCI F/M 025-70</i>	unid	1
Chave NA <i>Push Boton DS-323</i> sem Trava termais 023-9	unid	1
Placa <i>Raspberry Pi 0 W</i> - Adafruit	unid	1
Clips de cabo de aço 1/8" inox	unid	3
Cabo de aço 3/32" 2,4mm 6x7 AA inox	m	21
Cabo de rede blindado - 4 pares	m	20
Carretel plástico	unid	1
CAP centralizador (75mm / 86 mm)	unid	1
Abraçadeiras de <i>Nylon</i> 100 mm x 2,5 mm	pcte	1
Prensa -cabo	unid	1
O-ring	unid	1

A Figura 98 ilustra o circuito eletrônico de leitura e envio de dados montado. Como houve um dano gerado na saída digital de um dos sensores, a estratégia para transpor esse problema foi introduzir o módulo conversor analógico/digital *ADS 1115* e converter as leituras analógicas do sensor para leituras digitais, como pode ser visto na Figura 96a.

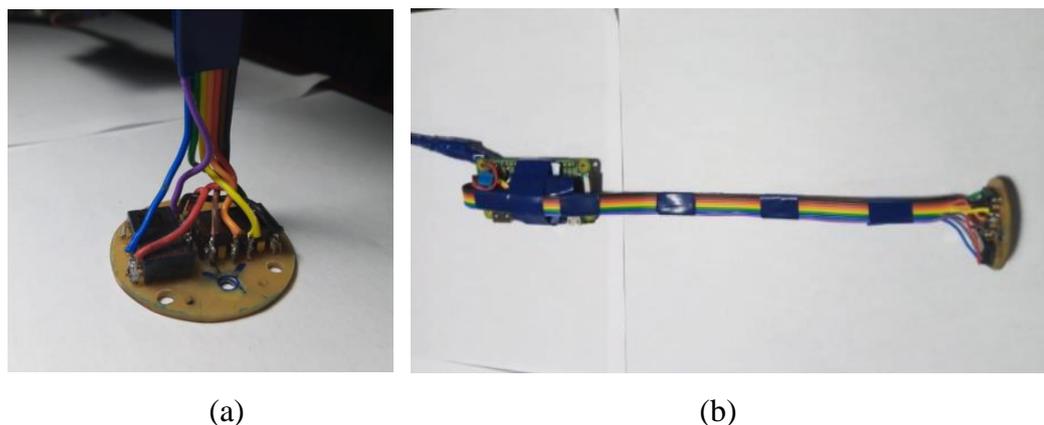


Figura 98 – Construção do circuito eletrônico do inclinômetro: a) Detalhe dos inclinômetros instalados na base; b) detalhe do circuito eletrônico da leitura. (Fonte: Própria, 2021)

Na ilustração a seguir (ver a Figura 99) é possível visualizar os componentes constituintes da sonda inclinométrica experimental UFRGS na fase final. A Figura 99a apresenta a *black-box* de comunicação que serve de proteção e armazenamentos dos circuitos de comunicação sonda/notebook apresentados na Figura 96a e na Figura 96b.

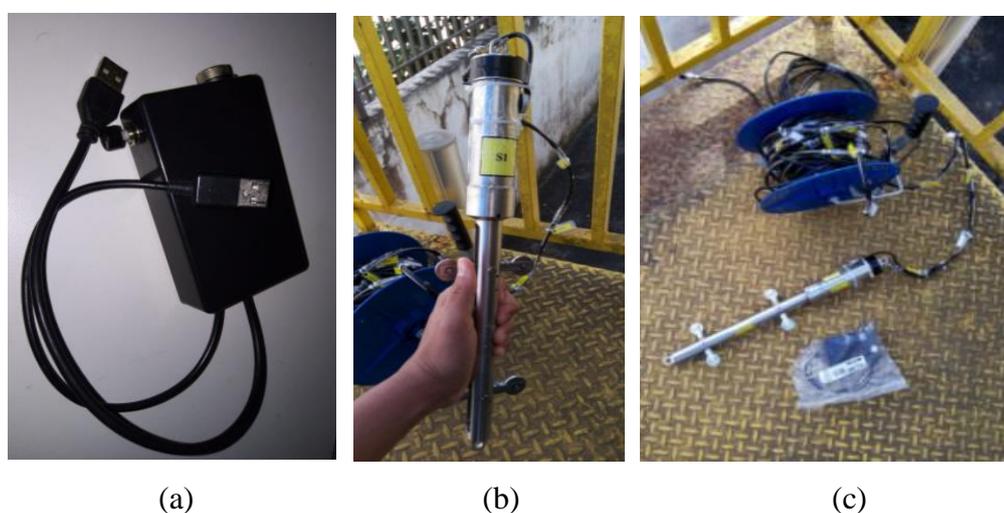


Figura 99 – Inclinômetro UFRGS: a) *black-box* de comunicação; b) sonda ou torperdo inclinométrico; c) componentes constituintes do sistema inclinométrico. (Fonte: Própria, 2021)

Quanto a sonda inclinométrica experimental UFRGS, é possível visualizar na Figura 99b o equipamento em seu estado final com o circuito eletrônico (ilustrado na Figura 98) já instalado e com as etiquetas de identificação do sentido de posicionamento dos sensores aderidas na carcaça da sonda. Por fim, o cabo de envio de sinal foi reforçado com cabo de aço inoxidável

(especificado na Tabela 13) e marcado (ver a Figura 99c), de maneira equidistante a cada 15 cm (distância entre os eixos dos pares de rodas da sonda), com abraçadeiras de *nylon* e identificações de comprimento acumulado para facilitar as leituras em profundidade.

5.4 ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNIVERSIDADE PASSO FUNDO/RS

Nesta etapa da tese estão detalhados todos os aspectos referentes a localização, caracterização do solo e procedimentos e ensaios realizados no campo experimental de Passo Fundo/RS. Foram descritos os procedimentos de medições de desaceleração do martelo, de medições de vibrações superficiais, análises paramétricas, ensaios de campo (ensaio de placa e SPT) e ensaios de laboratório (triaxiais CID, ensaio de compactação, sucção matricial etc.).

5.4.1 Localização do estudo

Os ensaios foram realizados numa área localizada num platô de solo natural existente nas proximidades do laboratório de Engenharia Civil do campo experimental da Universidade de Passo Fundo/RS, conforme marcado na Figura 100.



Figura 100 – Localização dos estudos no campo experimental da Universidade de Passo Fundo/RS. (Fonte: Própria, 2021)

As coordenadas do ponto na região de estudo é $28^{\circ}13'35.7''S$ $52^{\circ}23'11.8''W$, sendo esta região escolhida por apresentar um solo laterítico argiloso de baixa capacidade de suporte e com característica homogênea, conforme parâmetros e propriedades anunciados no item 5.4.2.

5.4.2 Solo laterítico argiloso de Passo Fundo/RS

Segundo Faro (2014), o solo laterítico (ver a Figura 101a) do campo experimental de Passo Fundo/RS tem um aspecto residual homogêneo (ver a Figura 101b) oriundo da decomposição de rochas basálticas (ígneas) e arenitos (sedimentos arenosos cimentados). Contudo, Sachetti *et al.* (2014) após análises petrográficas a partir de fluorescência de raio X das rochas existentes em Erechim e Passo Fundo, demonstraram que a formação solo provém da intemperismo de uma rocha ígnea ácida denominada Riodacito (Riolito + Dacito). Estas rochas são constituídas basicamente por quartzo e feldspatos (plagioclásios e feldspatos alcalinos), os riolitos são equivalentes vulcânicas dos granitos, pois possuem os mesmos minerais.

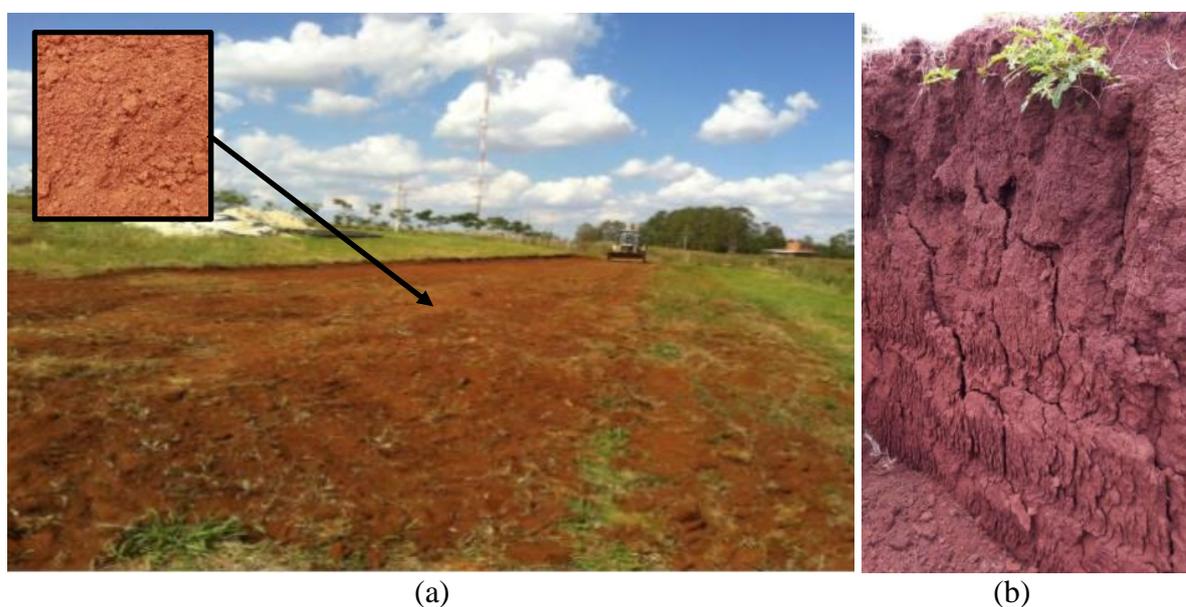


Figura 101 – Solo laterítico do campo experimental de Passo Fundo/RS: a) Vista (Fonte: Modificado de Faro, 2014); b) Perfil estratigráfico do solo. (Fonte: Própria, 2020)

Streck *et al.* (2002) citaram que em termos pedológicos, o solo da região de Passo Fundo/RS é caracterizado como um Latossolo Vermelho Distrófico típico Argissílico componente da Unidade de Passo Fundo. No Brasil há predominância das classes Latossolos, Argissolos e Neossolos, que em conjunto se distribuem em aproximadamente 70% do território nacional. Especificamente, as classes Latossolos e Argissolos ocupam aproximadamente 58% da área e geralmente são solos profundos, altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e, em certos casos, com alta saturação por alumínio. (EMBRAPA, 2006)

Do ponto de vista geotécnico, Consoli *et al.* (1998) explicaram que o solo residual oriundo de rocha basáltica é um material típico na região sul do Brasil. Solos residuais são resultado do

intemperismo, o que geralmente diminui a densidade e aumenta a porosidade, e suas propriedades sofrem uma certa influência do histórico de tensões a que este solo já foi submetido devido a ligação entre partículas decorrente tanto da cristalização associada com a formação de minerais, quanto da precipitação de células minerais. Desta forma, produzem uma estrutura cimentada e porosa que conseqüentemente leva os solos residuais a apresentarem comportamentos geotécnicos distintos dos solos sedimentares, ainda que apresentem densidade e granulometria similares.

Quanto à composição mineralógica, há uma predominância do argilo-mineral caulinita e óxidos de ferro (perceptível pela peculiaridade cromática vermelha). Vale também mencionar que o solo apresenta baixa CTC (atividade de argila inferior a 17 cmol/Kg), acentuada acidez, baixas reserva de nutrientes e toxicidade por alumínio para as plantas.

Existem alguns trabalhos mais recentes, como o de Rossi (2019) e Giese (2019), que caracterizam o solo do campo experimental como coesivo-friccional. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), na categoria de solos coesivos friccionalis encontram-se os solos residuais e outros geomateriais que possuem alguma cimentação conferindo assim alguma resistência friccional, sendo a contribuição desta cimentação na resistência e na deformabilidade dificilmente determinadas.

Segundo CPRM (2019), o campo experimental da Universidade de Passo Fundo está inserido na formação de intitulada pela simbologia K1βpr (ver a Figura 102) correspondente à fácies Parapanema que integra a Formação Serra Geral, pertencente ao éon Fanerozóico, era Mesozóica, período Cretáceo.

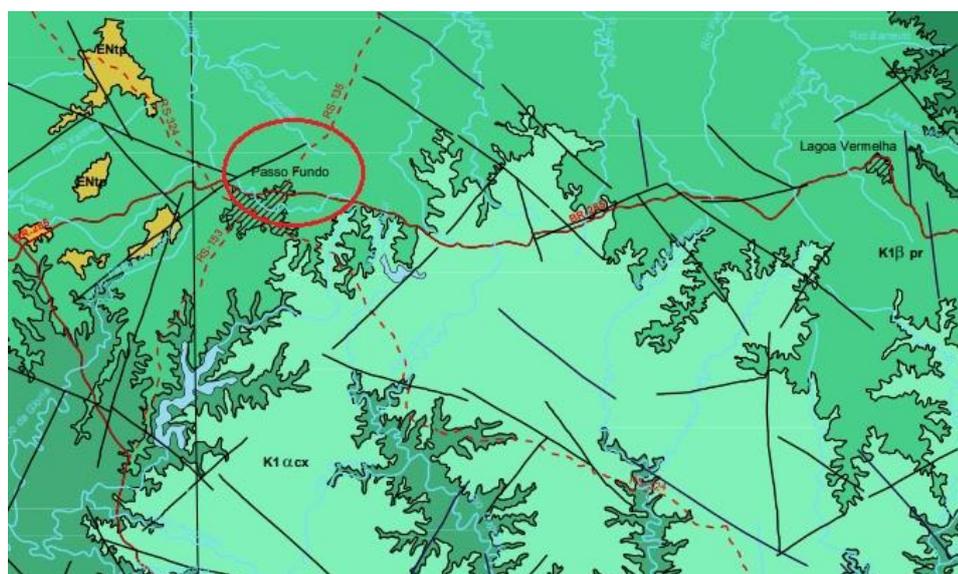


Figura 102 – Mapa Geológico do estado do Rio Grande do Sul. (Fonte: CPRM, 2019)

As fácies Paranapanema possuem como característica a presença de derrames basálticos granulares finos, melanocráticos, contendo horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo (ametista), zeolitas, carbonatos, seladonita, Cu nativo e barita, compreende a maior concentração das jazidas de ametista do estado.

Lopes Jr. e Thomé (2005) realizaram ensaios de SPT com lavagem e sem lavagem à percussão, executados no campo experimental de Passo Fundo/RS. Através destes ensaios se constatou que o perfil apresenta uma característica homogênea até 15m de profundidade, como pode ser visto na Figura 103.

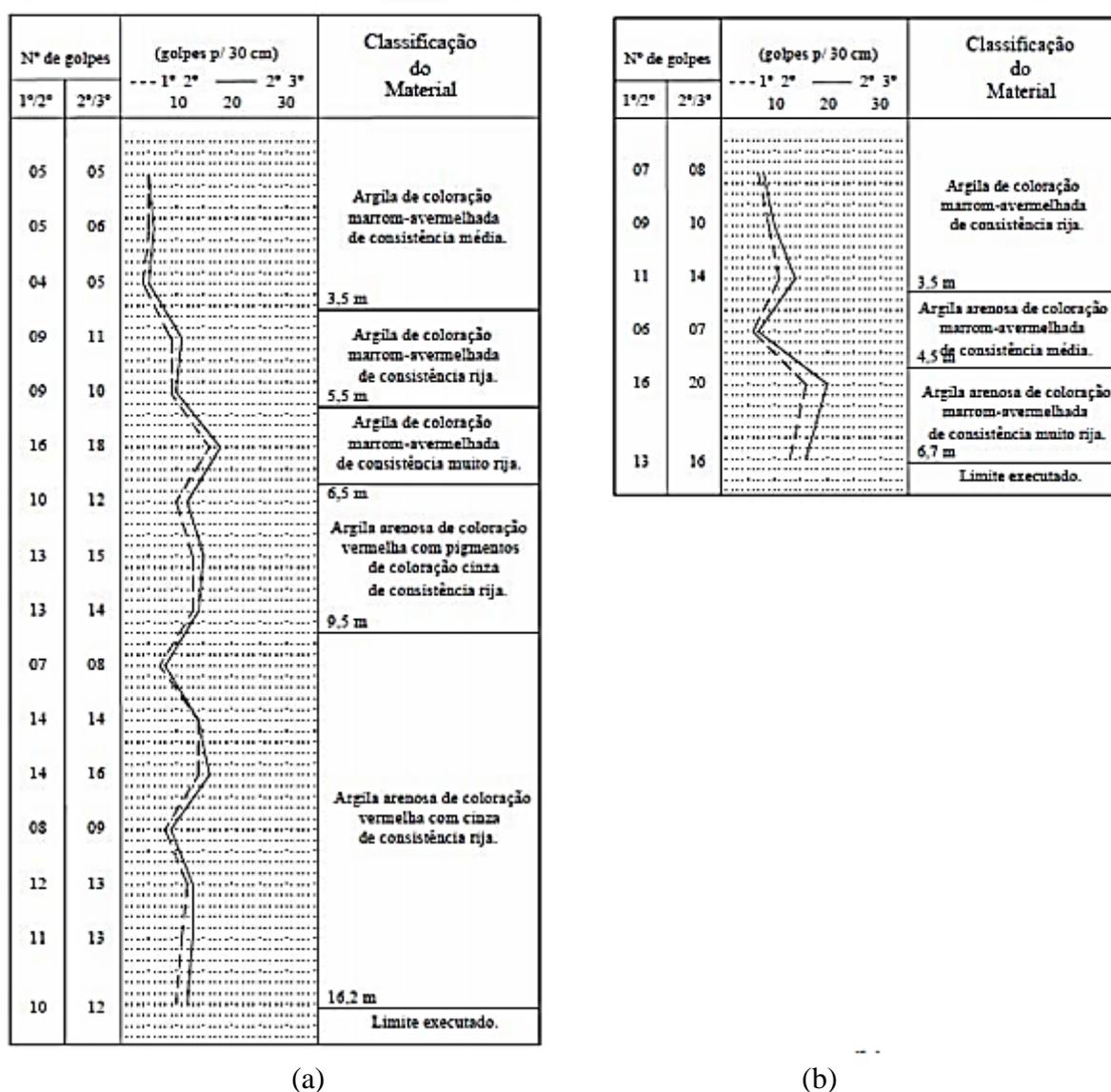


Figura 103 – Resultados de ensaios de SPT (*Standard Penetration Test*) no solo do campo experimental: a) com circulação de água; b) sem circulação de água e com uso de trado mecânico. (Fonte: Lopes Jr. e Thomé, 2005)

Faro (2014) executou cinco ensaios de CPT (ver a Figura 104a, Figura 104b e a Figura 104c) e DMT (ver a Figura 104d e Figura 104e) no campo experimental de Passo Fundo/RS e obteve características semelhantes ao do ensaio SPT da Figura 103. Como pode ser visto na ilustração a seguir, as respostas das sondagens indicaram que nos estratos superficiais (profundidades < 0,5m) possuem resistência de ponta entre 4 MPa e 6 MPa, provavelmente justificados pelas concentrações de óxidos hidratados de ferro e alumínio decorrente de lixiviação, assim como pela sucção total do estrato superficial que fica exposto ao sol. Entretanto, após esta diminuta camada mais resistente, o mesmo perfil exibiu valores no intervalo entre 1 MPa e 2 MPa até a cota de -15 m.

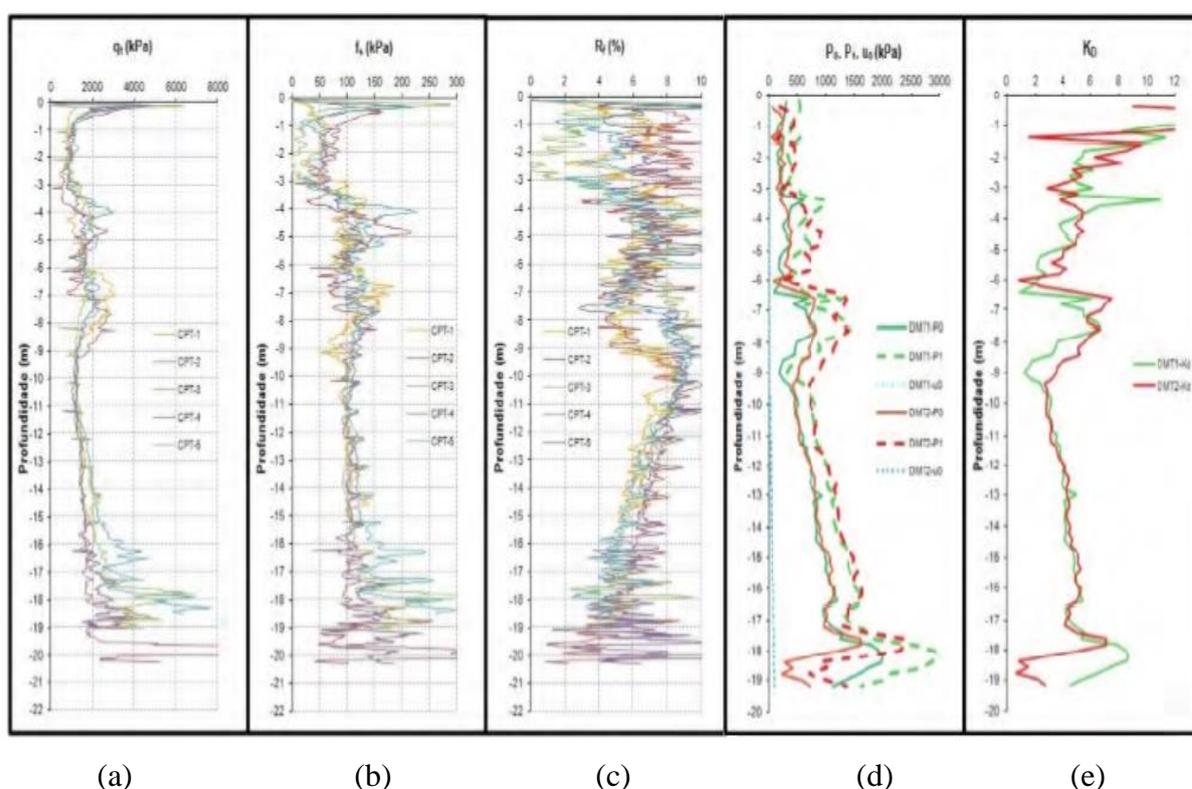


Figura 104 – Resultados de ensaios CPT e DMT realizados no solo de Passo Fundo/RS: a) q_c vs Hs; b) f_s vs Hs; c) R_f vs Hs; d) P_s , P_t e U_o vs Hs; e) K_o vs Hs. (Fonte: Faro, 2014)

Dalla Rosa *et al.* (2004a) realizaram uma investigação geotécnica até cota -5m por meio de amostras coletadas com auxílio de um trado manual, e estudaram os parâmetros teor de umidade, peso específico real dos grãos, limite de liquidez e limite de plasticidade ao longo da profundidade, como pode ser visto na Figura 105. A Tabela 24 informa as propriedades físicas resultantes dos estudos de Dalla Rosa *et al.* (2004), Ruver (2011) e Rizzon (2016).

Tabela 24 – Comparação entre os estudos das propriedades físicas dos solos laterítico argiloso de Passo Fundo/RS. (Fonte: Própria, 2018)

Propriedades	Estudos		
	Ruver (2011)	Dalla Rosa <i>et al.</i> (2004)	Rizzon (2016)
Umidade natural média – ω (%)	28,87	27 - 29	34
Peso específico dos grãos – G (kN/m ³)	26,7	26,5 - 28,2	26,7
Limite de Plasticidade – LP (%)	32,08 \pm 4,14	35	42
Limite de Liquidez – LL (%)	41,21	55	53
Índice de Plasticidade – IP (%)	9,13	20	11

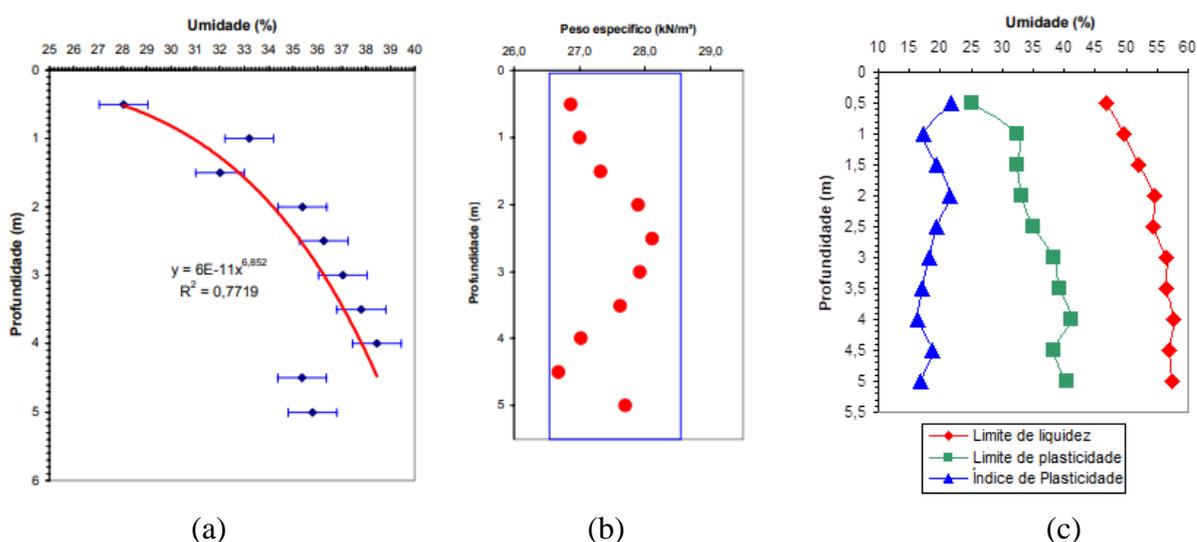


Figura 105 – Avaliação das propriedades e parâmetros geotécnicos ao longo de 5m de profundidade: a) teor de umidade natural; b) peso específico real dos grãos; c) limite de liquidez e limite de plasticidade. (Fonte: Dalla Rosa *et al.*, 2004)

Ruver (2011) realizou ensaios de classificação granulométrica, os quais foram procedidos em duas amostras, sendo:

- Lavado após processo de sedimentação (com uso de defloculante);
- Seco em estufa (sem uso de defloculante).

Os resultados das análises granulométricas através do peneiramento e sedimentação seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 6502 (1995) apontaram que o solo possui 0,45% de areia grossa, 2,06% de areia média, 18,57% de areia fina e 78,91% de finos (59% de Argila e 19,9% de Silte), conforme Figura 106a.

Dalla Rosa *et al.* (2004) concluíram em seus estudos, como pode ser visto na Figura 106b, que o solo possui uma granulometria homogênea até 5,0 m de profundidade, sendo ele composto por 2% de Areia Média, 25% de Areia Fina, 8% de Silte e 65% de Argila.

Rizzon (2016) obteve como resultado no ensaio de granulometria do solo laterítico argiloso de Passo Fundo/RS valores de 5% de Silte, 27% de Areia e 68% de Argila. Comparando as análises granulométricas da Figura 106 a e b e os resultados de Rizzon (2016), ambos estudos apresentam valores relativamente próximos, o que conduz a uma resposta granulométrica homogênea.

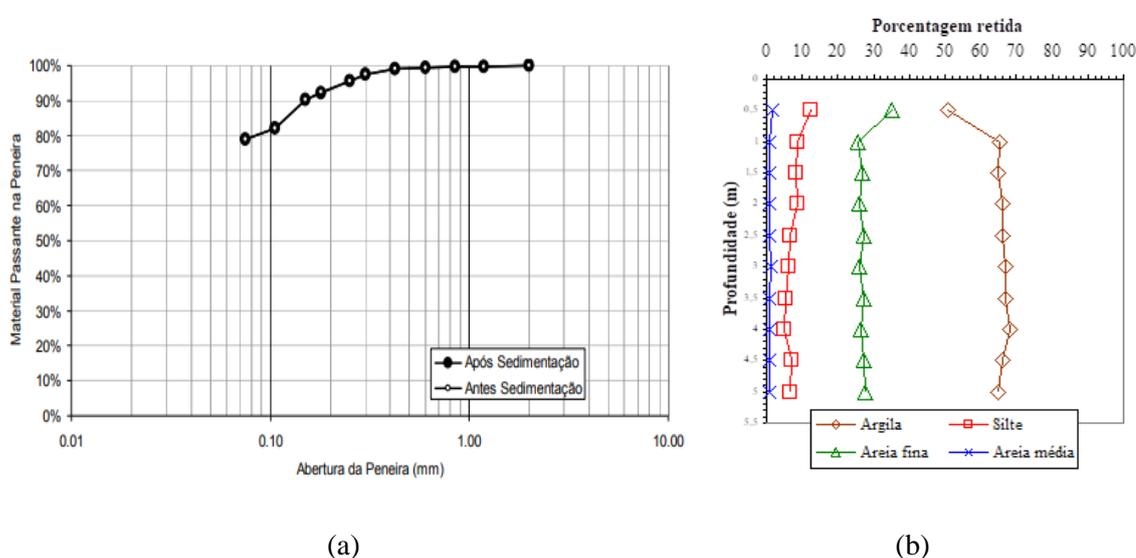


Figura 106 – Análise granulométrica do solo laterítico de Passo Fundo/RS: a) com e sem sedimentação (Fonte: Ruver, 2011); b) distribuição ao longo de 5m de profundidade. (Fonte: Dalla Rosa *et al.*, 2004)

Ruver (2011) citou que observando a granulometria e limites de plasticidade conclui-se que o solo laterítico do campo experimental de Passo Fundo (UPF) pode ser classificado como A-5-7 (Solo Silto Argiloso) pelo sistema AASHTO e CL (Argila de baixa a alta liquidez) pelo sistema SUCS. Ao realizar a caracterização através da sistemática M.C.T, Souza Junior *et al.* (2019) através do procedimento do Mini-M.C.V e ensaio de pastilha concluíram que o solo em questão atende aos requisitos do grupo LG', ou seja, Solo Argiloso com comportamento Laterítico, conforme Figura 107.

Pinto (2006) explicou que os solos lateríticos que sofrem evolução pedogênicas em regiões de clima quente com chuvas moderadas à intensas. Segundo Massad (2016), os solos lateríticos possuem camadas superficiais drenantes e que ainda sofrem processos físico-químicos e

biológicos em regiões tropicais. Dentre estes processos, a lixiviação ocorre consistentemente através do carreamento de sílicas, bases e argilominerais de camadas mais rasas até as camadas mais profundas, o que conseqüentemente possibilita uma grande concentração de óxidos hidratados de ferro e alumínio em camadas mais superficiais. Isso explica o aspecto ferruginoso aliado a presença dominante da caulinita, além disso ocorre a marcante presença de macroporos.

Ainda que sejam compressíveis em função da existência de macroporos [i.e., elevado índice de vazios], após serem compactados apresentam uma alta capacidade de carga e comportamento volumétrico peculiar (manifestam contração com redução do teor de umidade, mas não expandem com água). (PINTO, 2006)

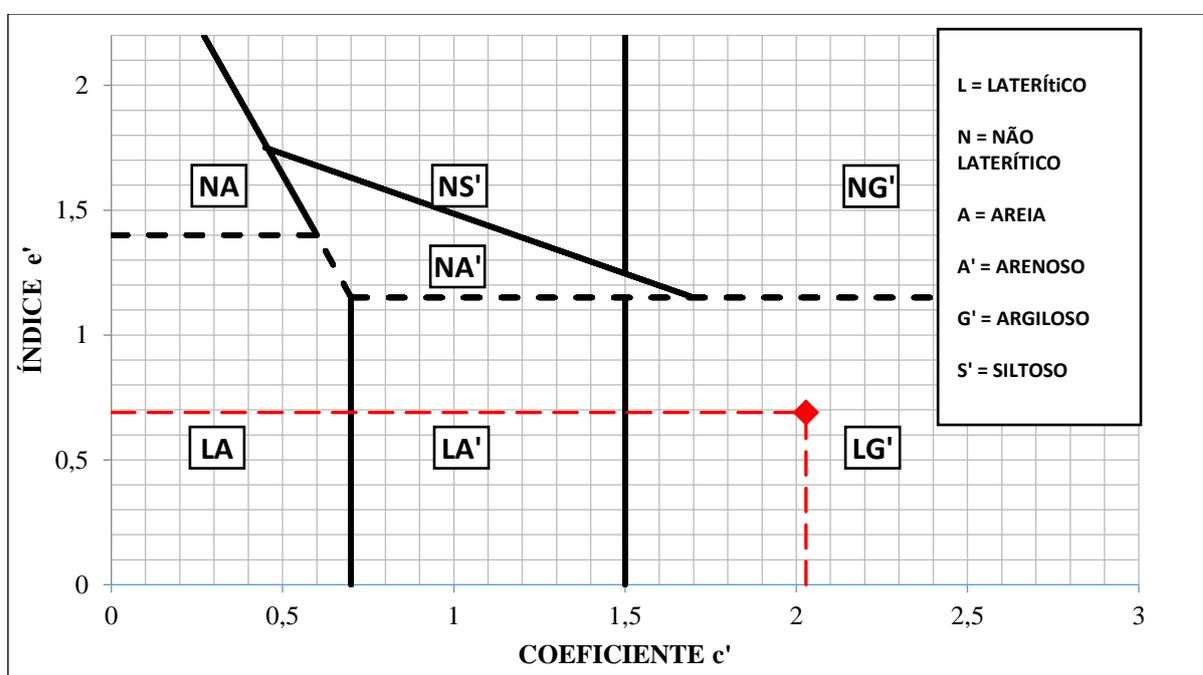


Figura 107 – Classificação do solo laterítico de Passo Fundo/RS a partir da sistemática M.C.T. (Fonte: Souza Junior *et al.*, 2019)

Quanto a resistência à compressão, Carreta (2018) obteve como resposta $q_{\text{médio}}$ de 89 kPa e $q_{\text{t médio}}$ de 24 kPa, já Dalla Rosa *et al.* (2004a) obtiveram valores de resistência à compressão de 54 kPa com amostras coletadas na superfície. Em termos de resistência ao cisalhamento do solo, Donato (2005) e Carretta (2018) realizaram ensaios triaxiais CID cujos gráficos estão apresentados na Figura 108.

Para as tensões confinantes trabalhadas, Donato (2005) apresentou como c' e φ' valores de 23,8 kPa e 31,84°, contudo Carretta (2018), obteve como parâmetros efetivos de coesão c' e φ' valores de 9,52 kPa e 30,5°, respectivamente, sendo levemente inferiores aos valores obtidos

por Giese (2019) em estado compactado. A oscilação entre os interceptos coesivos de Donato (2005) e de Carretta (2018) pode estar vinculada a variação das profundidades de coleta das amostras indeformadas ou dos valores adotados de σ_3 .

Além disso, como pode ser visto na Figura 108, a resposta gráfica da trajetória de tensões sugere uma formação de superfície de plastificação até $p' \approx 90$ kPa, ou seja, o limite de tensões que iniciam o desenvolvimento de deformações irreversíveis.

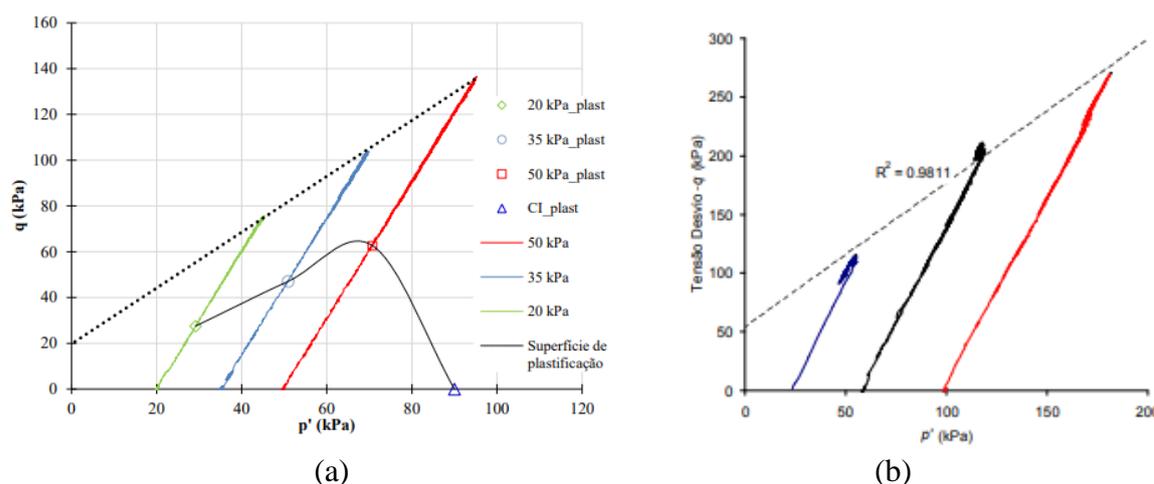


Figura 108 – Trajetórias de tensões (CID) do solo de Passo Fundo/RS: a) σ_3 de 20 kPa, 60 kPa e 100 kPa (Fonte: Donato, 2005); b) σ_3 de 20 kPa, 35 kPa e 50 kPa. (Fonte: Carretta, 2018)

Em termos de comportamento volumétrico, solo possui uma tendência contrátil (ou compressiva) conforme há aumento da tensão desviadora e independente da tensão confinante [Donato, 2015; Carretta, 2018]. Além disso, com base nos mesmos estudos, se provou que as respostas da relação tensão desviadora (kPa) vs deformação axial (%) variam de acordo aos níveis de tensões confinantes envolvidos. Como pode ser visto na Figura 109, ocorrem mudanças no comportamento do solo nas faixas de tensões confinantes $p' \leq 35$ kPa e $p' > 35$ kPa.

Salienta-se que a redução de rigidez, em função do baixo módulo elástico, do cp submetido a $p' = 20$ kPa no estudo de Carretta (2018) pode ser justificado por algo relacionado a heterogeneidade da amostra ou amolgamento. Quanto ao $p' \leq 35$ kPa observou-se uma tendência de comportamento elástico perfeitamente plástico, já para $p' > 35$ kPa se notou uma tendência de comportamento elastoplástico com endurecimento (*Strain Hardening*) que segundo Carretta (2018) é próprio de solos estruturados ensaiados à altas tensões confinantes.

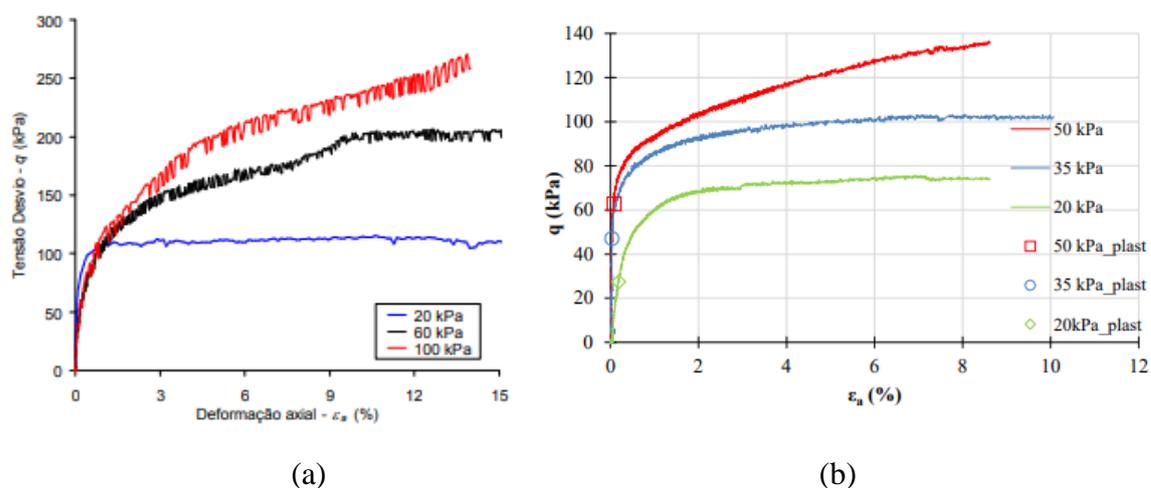


Figura 109 – Comportamento q vs ξ_{axial} (%) do solo de Passo Fundo/RS através do ensaio tipo CID: a) σ_3 de 20 kPa, 60 kPa e 100 kPa (Fonte: Donato, 2005); b) σ_3 de 20 kPa, 35 kPa e 50 kPa. (Fonte: Carretta, 2018)

5.4.3 Locação dos pontos de estudo

A locação dos pontos de estudo (PE) foi realizada com uso de estacas de madeira e identificada conforme ilustrado na Figura 110 com base na numeração da Tabela 14, seguindo a uma distância de 4m de comprimento, equivalente a 3 Dm, com base na sugestão de Lukas (1995) de solos de textura fina cujo enquadramento situa-se na próximo da faixa de 1,5 Dm a 2,5 Dm.

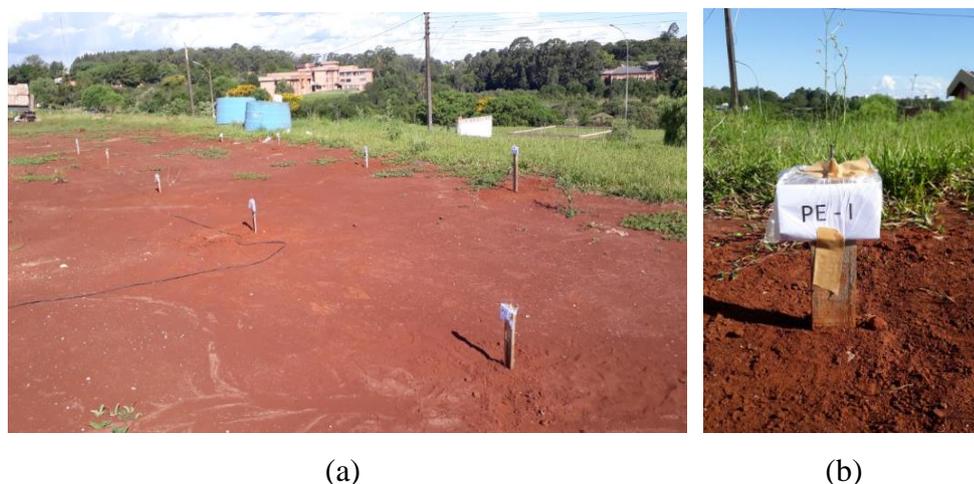


Figura 110 – Locação das estacas no campo experimental da Universidade de Passo Fundo/RS: a) Disposição das estacas; b) Detalhe da identificação da estaca. (Fonte: Própria, 2020)

Sekowski *et al.* (2018) estimaram que o raio da zona pode atingir até 2,5 Dt. Em consideração a isto, a aplicação do método da substituição dinâmica pode gerar aumento significativo da capacidade de suporte e rigidez do conjunto fundação-solo. A planta de locação dos PE's em campo encontra-se ilustrada no Apêndice C.

5.4.4 Especificação dos equipamentos utilizados no campo experimental

Durante as atividades de campo foram utilizados alguns equipamentos e dispositivos, tais como: guindaste, gatilho, laços de poliéster, cabos de aço, martelo de compactação, carrinho de mão, sismógrafo, trenas etc.

Primeiramente, o equipamento de içamento do martelo de compactação utilizado na pesquisa foi guindaste hidráulico telescópico XCGM QY60K (ver a Figura 114a) de uma empresa local. O guindaste com dimensões de 13,5 m x 2,8 m x 3,51 m (comprimento x largura x altura) e tem capacidade máxima de 60 toneladas, com altura máxima de elevação da lança telescópica (lança oviforme com estabilizadores semi estendidos a 5,3 m e contrapeso 5,5 t) de 42m e altura Máxima de Elevação Lança Telescópica + JIB (lança oviforme com estabilizadores totalmente estendidos a 5,3 m e contrapeso 5,5 t) de 58 m.

Quanto ao sistema gatilho (Figura 111), o conjunto era composto por:

- a) Um gatilho (conforme especificado no Apêndice B);
- b) Duas manilhas curvas com (corpo forjado em aço carbono 1045 e pino reforçado de aço Alloy, porca e cupilha), carga de trabalho de 17 tf (Fator de segurança 6:1), modelo MCA 038 PPC, seguindo os requisitos da NBR 13.545 (2012);
- c) Um laço redondo de carga útil de 10 tf (Fator de segurança de 7:1), material 100% poliéster, com dimensões de 1 m de largura, 2 m de comprimento e diâmetro de 56 mm, seguindo os requisitos das NBR 15637-1 (2017) e NBR 15637-2 (2017);
- d) Três cabos de aço com extremidades em laço de carga útil de 5,5 t.

O conjunto de liberação do martelo funcionou acoplado no laço redondo (item C) ancorado ao guincho do caminhão guindaste, que por sua vez encontrava-se envolto à manilha fixada no corpo do gatilho conforme ilustrado na Figura 111. O martelo de compactação era preso a cabos de aços ancorados na outra manilha, cuja mesma alocava-se no interior do gatilho. Quando acionado, o gatilho abria o corpo móvel e liberava o a manilha com o martelo de compactação acoplado.



Figura 111 – Conjuntos de liberação do martelo de compactação: a) vista do gatilho, laço e as manilhas; b) vista lateral do gatilho. (Fonte: Própria, 2019)

Em função dos problemas vivenciados em campo quanto as dificuldades de abertura do gatilho, algumas modificações foram realizadas na estrutura, como ilustrado na Figura 112. Primeiramente, as anilhas foram substituídas por peso único no trecho do eixo cilíndrico pois as anilhas mudavam sua posição quando acionada a alavanca. Em seguida, o cabo de aço foi substituído por corda de multifilamento trançada 8 mm para facilitar o acionamento manual aliado a flexibilidade. Por fim, a conexão entre a trava e a alavanca sofreu rompimento contínuos durante os ensaios de campo, e, portanto, foi substituído por um sistema de chapa articulada (Trava / Alavanca).

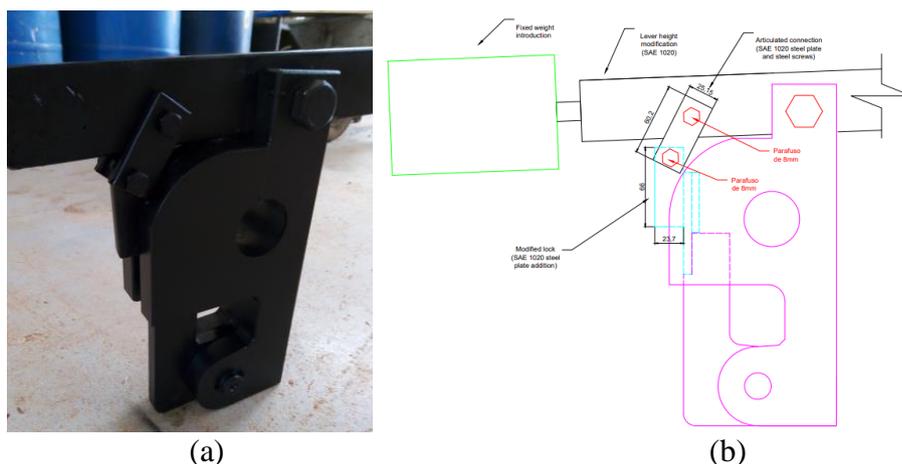


Figura 112 – Conjuntos de liberação do martelo de compactação alterado: a) Vista do gatilho, laço e as manilhas; b) Vista lateral do gatilho. (Fonte: Própria, 2019)

A Figura 113 ilustra o procedimento de montagem realizado no campo. Como pode ser visto, a sequência executiva é simplificada. Após a fixação do laço de poliéster no guincho do

guindaste, o mesmo era preso na manilha e fixado no corpo do gatilho. Partindo disso, a manilha com os 3 cabos de aço com ponta em laço nas duas extremidades era introduzida no corpo e posteriormente travada com o sistema trava/gatilho. Feito isto, as outras extremidades do cabo de aço em laço eram presas no martelo de compactação. Terminado estes procedimentos, o martelo pode ser finalmente içado e liberado na cota especificada.

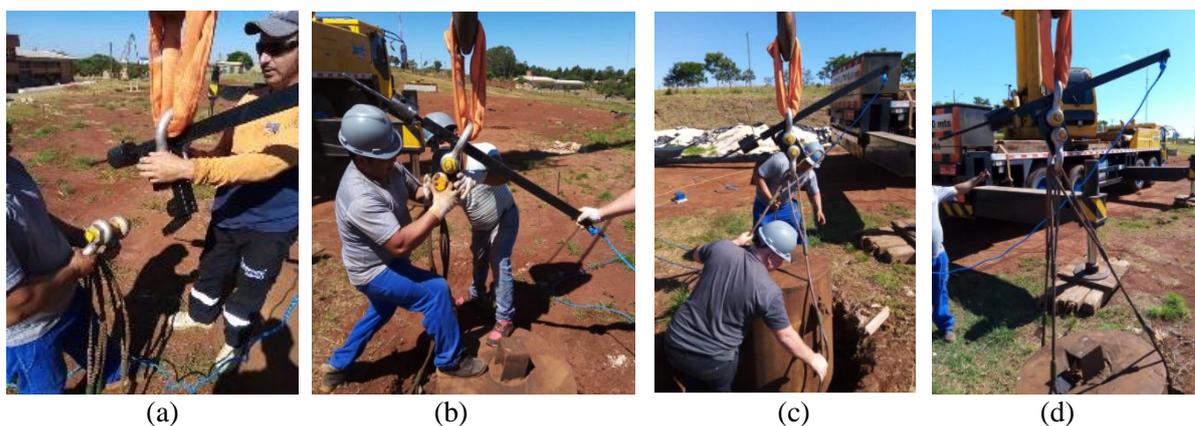


Figura 113 – Procedimento operacional de montagem do gatilho: a) Introdução da manilha metálica no corpo; b) Travamento do gatilho (levantamento da alavanca); c) Fixação dos cabos de aço nas bordas do martelo; d) Preparação para içamento da peça. (Fonte: Própria, 2020)

O caminhão-guindaste de capacidade de 60 t utilizado para içamento do martelo pode ser visto na Figura 114a. A Figura 114b apresenta com detalhe o sistema de compactação dinâmica montado. O martelo foi conectado a manilha 20 t, que por sua vez ficava acoplada no gatilho e uma outra foi fixada na abertura superior do gatilho e que se prende ao laço de poliéster e que por sua vez ao guindaste.

Na manilha que o martelo foi fixado (presa à abertura superior) existem 3 cabos de aço com ponta em laço em suas extremidades, de forma que uma extremidade se prende a manilha e a outra se prende ao suporte lateral do martelo. Estes suportes são os pontos de apoio para içamento do martelo e eles encontram-se defasados em ângulos de 120° para melhor distribuição de tensões.

Quanto ao gatilho de liberação do martelo foi utilizado o concebido nesta pesquisa (ver o item 5.2). O martelo de compactação foi o mesmo utilizado na pesquisa de Rizzon (2016) e Giese (2019). O martelo possui uma massa de 5,5 toneladas, com tensão de contato de 48 kN/m^2 (ver a Tabela 14) e a geometria cilíndrica e dimensões apresentadas na Figura 115.



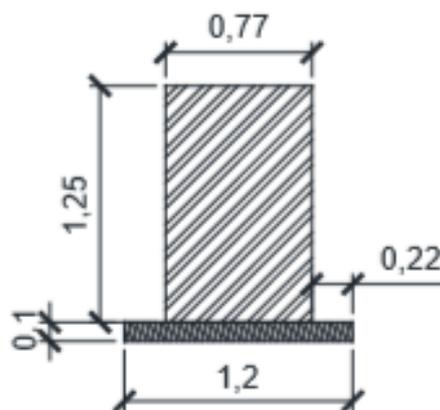
(a)

(b)

Figura 114 – Sistema de compactação dinâmica utilizado no estudo: a) equipamento de guindaste utilizado; b) detalhe do gatilho fixado ao guindaste com o martelo acoplado. (Fonte: Propria, 2020)



(a)



(b)

Figura 115 – Martelo de compactação utilizado no estudo: a) martelo de compactação; b) dimensões geométricas da peça. (Fonte: Rizzon, 2016)

A fundamentação da escolha do martelo de compactação com esta geometria e massa satisfaz a conclusão do trabalho de Han (1998), que cita que a substituição dinâmica se torna mais eficaz à medida que o martelo de compactação possui um diâmetro menor e maior peso. Aliado a isto, o solo estudado possui um elevado grau de saturação *in situ* o que sustenta a

hipótese de que cargas muito maiores elevariam a punção no solo, mas não incrementaria resistência mecânica e aumentariam as deformações plásticas volumétricas.

5.4.5 Procedimentos operacionais da substituição dinâmica no campo experimental

Para controle da altura de queda foi utilizado o procedimento de lei de Pitágoras abordado no trabalho de Giese (2019) com auxílio de uma corda de *nylon* com uma extremidade fixada a alça do martelo. Além disso, a profundidade da cratera, conforme ia aumentando em função dos golpes, foi monitorada com auxílio de trena metálica em referência centro da cratera.

Após a produção da cratera, foi realizado o preenchimento com areia de Osório/RS com baixo teor de umidade (até 3%) com auxílio de dois carrinhos de mão. O carrinho de mão foi utilizado para fins logísticos, assim como para estabelecimento do controle do material introduzido na cratera. Como pode ser visto a seguir (ver a Figura 116), após o preenchimento do carrinho de mão, o material era nivelado com um sarrafo de madeira para que se preenchesse apenas o volume da caçamba.

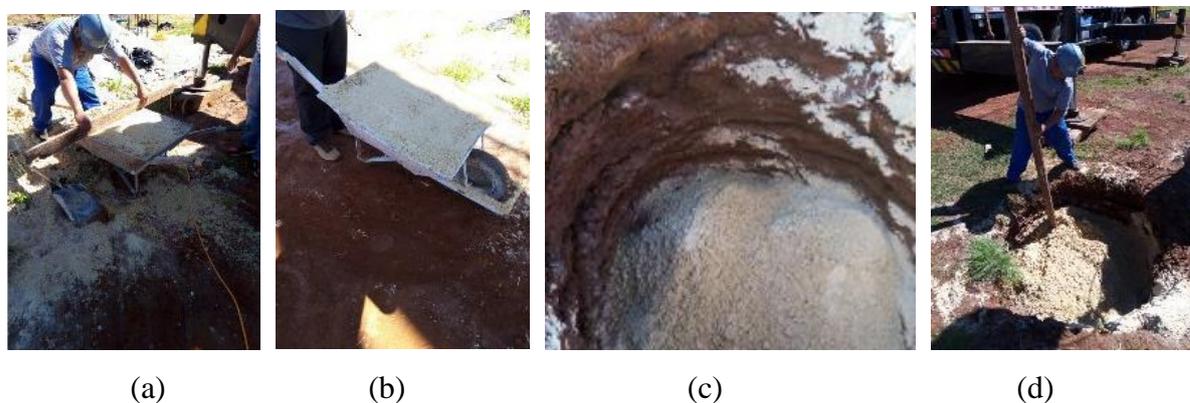


Figura 116 – Procedimento de preenchimento de cratera: a) Carrinho de mão sendo preenchido e nivelado; b) carrinho de mão preenchido; c) cratera em fase de preenchimento; d) espalhamento do material na cratera. (Fonte: Propria, 2020)

Na mesma Figura 116, após o preenchimento do material na cratera, em camadas, o material era uniformemente espalhado com auxílio de um sarrafo de madeira. Após isto, o material era submetido à compactação com o martelo. Na Figura 117 apresentam as colunas granulares construídas no campo experimental. Houve um controle de altura de queda e de quantidade de material introduzido, mas não houve um controle de compactação por camada dos PE's.



(a)

(b)

Figura 117 – Colunas granulares de DR: a) disposição das colunas granulares; b) Aspecto visual da coluna granular. (Fonte: Propria, 2020)

5.4.6 Medições de desaceleração do martelo

As medidas de desaceleração e medida de força de impacto foram realizadas através de medições de frames com base no *software Tracker*® (ver a Figura 118) igualmente realizado por Giese (2019) fundamentado no trabalho de Oshima e Takada (1994) sobre cálculo de desaceleração, velocidade de impacto e força de impacto. Este método se baseia na coleta da coordenada do mesmo ponto de imagem em diferentes *frames* em uma certa velocidade de filmagem. Este estudo foi realizado para o impacto do martelo de 55 kN à 8 m de altura, no primeiro golpe (queda livre) da substituição dinâmica.

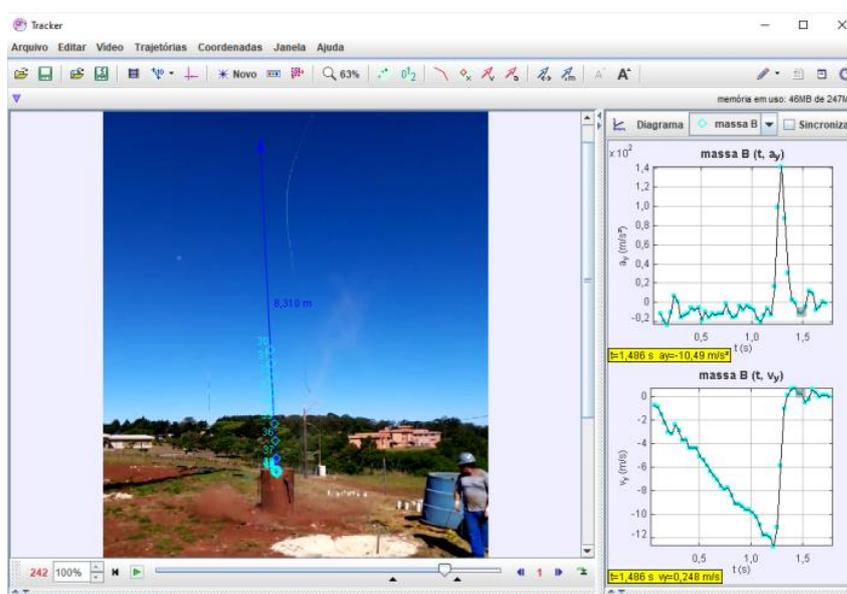


Figura 118 – Funcionamento do programa *Tracker*®. (Fonte: Própria, 2020)

5.4.7 Medições de vibrações do solo

Para obter as medidas de vibração foi utilizado um sistema de sismógrafo composto por um *notebook*, um sismógrafo e um sensor de velocidade. A medida de vibrações do solo foi realizada com auxílio do equipamento sismógrafo modelo *GMS Plus 6* da empresa Suíça Geosig® ilustrado na Figura 119a. O *recorder* (ou *Datalogger*) possui 6 canais de saída (2 canais de sensores, 1 canal de GPS, 1 canal serial, 1 canal de *Ethernet* e um canal *Power*) e geometria (considerando a base) de 296 x 225 x 156 mm (comprimento x largura x altura). O sensor mede com tensões $\pm 2,5$ V ou 10 V (*Differential or single-end*), possui um painel indicador *LED* que anuncia os status de leitura (*active, run, event, network e warning*). O *Recorder* foi programado para realizar leituras em faixas de tempo 0,005 s com registro de arquivos gatilho em TRG (*Trigger*) e leituras periódicas em RGB (*Ringbuffer*) de 30 em 30 min.

O sensor de velocidade usado foi o modelo VE-13 (ver a Figura 119b). Ele é composto por uma caixa de alumínio com dimensões de 193 mm x 112 mm x 94 mm (comprimento, largura e altura) com massa de 2 kg. Este sensor capta velocidades de propagação de ondas na faixa de ± 100 mm/s nas direções triortogonais (x, y e z) referentes às direções radiais, tangenciais e verticais. A faixa de temperatura de operação é 25° C à 85° C com frequência de resposta de 1 Hz à 315 Hz e com niveladores de base de até 10°.



Figura 119 – Equipamento sismógrafo: a) *Recorder*; b) sensor de velocidade. (Fonte: Geosig, 2020)

Na figura a seguir (ver a Figura 120) encontra-se ilustrado o equipamento montado em campo. O sistema é composto pelo *recorder* acoplado no *notebook* através de um cabo *Ethernet* e pelo sensor VE-13 ligado ao *Recorder* no canal de sensor. Na mesma imagem pode ser percebido que o sensor ficou apoiado numa placa de concreto para mitigar os ruídos na leitura de velocidade do sensor.

As configurações de horário de ensaio, calibração do equipamento e início de leitura foram realizadas por meio de uma entrada *HDMI* no interior do *recorder* que por sua vez era ligada ao *notebook* por uma entrada *USB* e processadas através do emulador *UCON*®. Todo o sistema foi alimentado através de um ponto de fornecimento de energia local.

Os arquivos de leitura do equipamento durante às atividades de compactação dinâmica eram gerados pelo *software* Geodas® em extensão em *.msd*. Os arquivos eram editados em planilhas *Excel*® para isolar as leituras com os diferentes critérios de altura de queda e distância de leitura. Posteriormente, essas leituras foram submetidas a interpretações por meio de uma programação feita em *Python*® por intermédio do módulo *Jupyter*® para desenvolvimento de gráficos de velocidade no tempo e desenvolvimento de em espectrograma (densidade espectral) para avaliação das frequências de maiores energias após compactação. Os ensaios seguiram os critérios de altura e distância informados no Item 3.

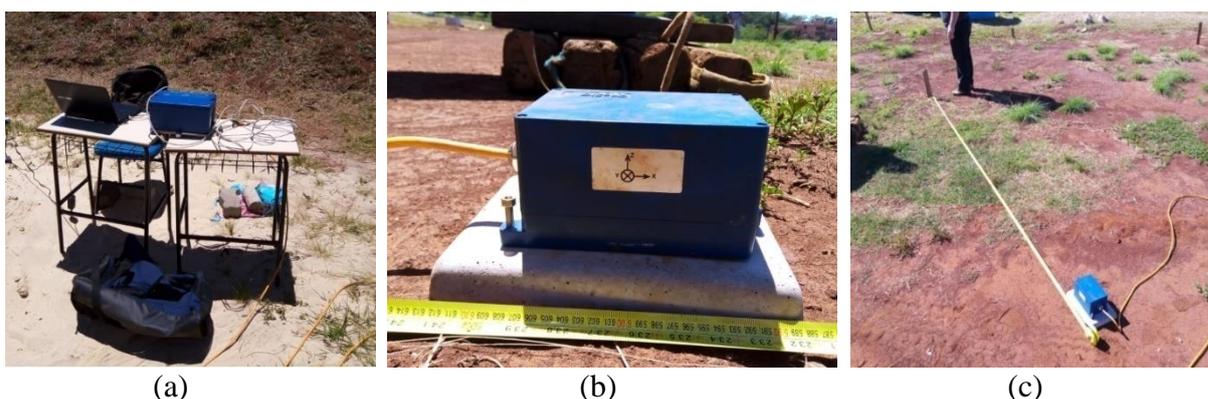


Figura 120 – Equipamento sismógrafo instalado no campo: a) *Recorder* instalado no *notebook*; b) detalhe do sensor de velocidade no campo; c) sensor de velocidade locado. (Fonte: Própria, 2020)

5.4.8 Definição da profundidade da coluna granular e da espessura da camada melhorada

Antes da efetivação dos ensaios de campo, foram realizadas simulações numéricas para determinar o efeito da espessura da camada melhorada, em função da relação H_{cam}/D_{pl} e de L , levando em conta os recursos disponíveis. Desta forma, foram realizadas 6 simulações numéricas contemplando o efeito da variação da espessura da camada melhorada e o efeito da espessura da coluna granular referentes aos pontos de estudos

Para tanto, se utilizou o pacote de *software* ABAQUS® que possibilita análises bidimensionais e tridimensionais de modelos com base no MEF. A análise numérica foi

desenvolvida considerando o modelo elástico linear perfeitamente plástico com superfície de ruptura *Mohr-Coulomb*, em modelo axissimétrico e malha quadrática estruturada com dimensões variáveis entre 5 cm e 50 cm. Considerando que o solo, ao ser compactado, sofre redução volumétrica no sentido vertical e não no sentido horizontal, a profundidade de melhoria resultou em uma coluna perfeitamente cilíndrica com diâmetro de 1,30 m (diâmetro do martelo + 10 cm).

Em termos de condições de contorno, foram introduzidos apoios fixos no eixo axissimétrico e no plano horizontal X (perpendicular ao eixo axissimétrico) e introduzidos apoios móveis perpendiculares a eixo Y paralelo ao eixo axissimétrico. O valor de D foi calculado para $\eta = 0,50$, conforme dito por Giese (2019), considerando o peso do martelo de 55 kN e altura de queda de 8,00 m, sendo igual a 3,35 m. Os parâmetros adotados na simulação estão informados na Tabela 25 e Tabela 26 a seguir.

De um modo geral, os parâmetros do solo compactado e da camada melhorada foram estimados com base nas informações extraídas dos trabalhos de Giese (2019) e Rossi (2019). Em relação a placa, foram adotados os parâmetros do material aço ($\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$, $E = 200.000 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,3$). Quanto as condições de interação dos materiais envolvidos, foram considerados apenas as interações entre a camada melhorada e a placa metálica ($\mu_{\text{camada/placa}} = 0,60$), a camada melhorada e a areia de Osório/RS ($\mu_{\text{camada/areia}} = 0,50$) e da camada melhorada com o solo circundante à camada ($\mu_{\text{camada/solo PF}} = 0,1$).

Tabela 25 – Parâmetros considerados para avaliação das espessuras das colunas granulares. (Fonte: Própria, 2021)

Estrato	Coluna granular		Parâmetros					
	L = 1000 mm	L = 2000 mm	c' (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Ψ	E _{Young} (MPa)	N
Areia de Osório/RS (compactada) *	1,00	2,00	0	32	17,9	11	27	0,3
Solo de Passo Fundo/RS	---	---	9,52	30,5	15,9	10	20	0,3
Solo de Passo Fundo/RS (compactado)	3,35	3,35	0	35,9	17,5	10	18	0,25

*Foi considerado um valor de índice de vazios igual a 0,79 (valor médio obtido no campo).

A escolha da espessura, tanto da camada melhorada quanto da coluna granular, se deu de forma que houvesse representação do comportamento pouco resistente, resistente de maneira

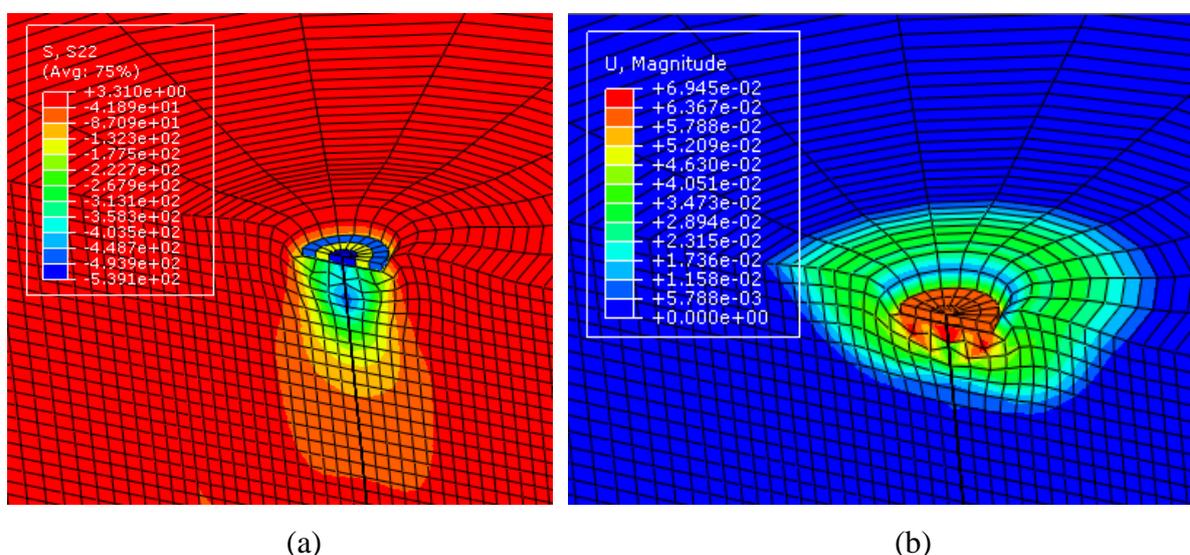
intermediária e muito resistente do melhoramento proposto para verificar a relevância dos parâmetros no estudo experimental.

Tabela 26 – Parâmetros considerados para avaliação das espessuras das camadas melhoradas. (Fonte: Própria, 2021)

Estrato	Coluna granular + Camada melhorada				Parâmetros					
	$H_{cam} = 150 \text{ mm}$		$H_{cam} = 500 \text{ m}$		c' (MPa)	φ (°)	γ (kN/m ³)	Ψ	E_{young} (MPa)	ν
Camada melhorada	0,15	0,15	0,50	0,50	60	36	17,9	18	65	0,25
Areia de Osório/RS (compactada) *	0,85	1,85	0,50	1,50	1	32	17,9	11	27	0,3
Solo de Passo Fundo/RS	---	---	---	---	9,52	30,5	15,9	10	20	0,3
Solo de Passo Fundo/RS (compactado)	3,35	3,35	3,35	3,35	1	35,9	17,5	10	18	0,25

*Foi considerado um valor de índice de vazios igual a 0,79 (valor médio obtido no campo).

Após a realização das simulações numéricas, se percebeu que a variação da L não provocou mudanças significantes quanto ao comportamento resistente e deformável da melhoria proposta. Mesmo com o aumento de L, como os bulbos de tensões gerados são proporcionais ao D_{pl} , de forma que as tensões estiveram praticamente concentradas na região do primeiro metro da coluna. Tendo em vista que D_{pl} é igual a 30 cm, teoricamente as tensões atingem profundidades máximas de 60 a 90 cm, conseqüentemente convergindo para um comportamento similar, conforme pode ser visto nas Figura 121 e Figura 122.



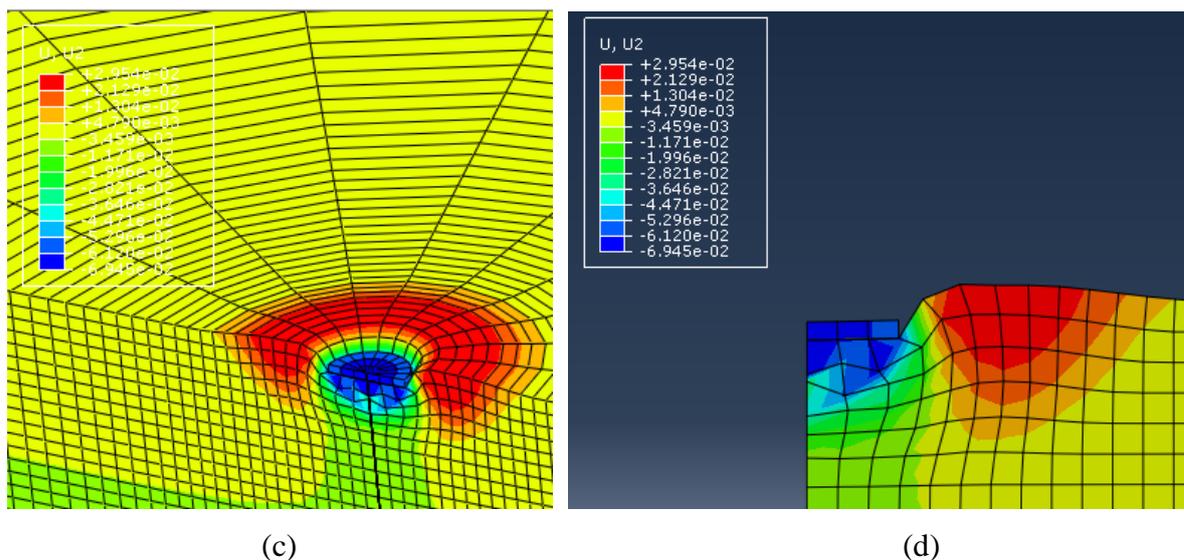


Figura 121 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular ($L=1000$ mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021)

Quanto ao efeito da H_{cam} , foi constatado ser uma variável significativa no que tange a capacidade resistente, como também na rigidez do sistema de melhoramento. Inicialmente pode ser notado na Figura 123, que ao introduzir uma H_{cam} igual a 150 mm houve uma mudança no comportamento deformável do sistema, de forma que a tensão aplicada foi absorvida pela placa e distribuída imediatamente na seção da coluna. Ainda que rígida, a placa exibe uma nítida flexibilidade ao se curvar na região da aplicação da carga em relação a região periférica, que por sua vez manifestou um leve soerguimento provavelmente por vinculado com a uma rotação.

Ao realizar a comparação dos resultados das simulações numéricas (ver a Figura 125) foi constatado que a variação de profundidade da coluna granular não apresentou mudanças significativas no comportamento P vs δ_{DV} provavelmente vinculada a baixa profundidade do bulbo de tensões desenvolvido no decorrer da aplicação do carregamento monotônico.

Em relação ao sistema com H_{cam} igual a 500 mm se percebe um comportamento mais rígido e mais resistente comparado às outras alternativas, conforme Figura 124. Assim como na placa de H_{cam} igual a 150 mm, o sistema com H_{cam} igual a 500 mm absorveu e possibilitou a distribuição das tensões oriundas da placa de aço imediatamente na região da seção da coluna granular sem manifestar expansão volumétrica (dilatância) e com magnitude ainda maiores.

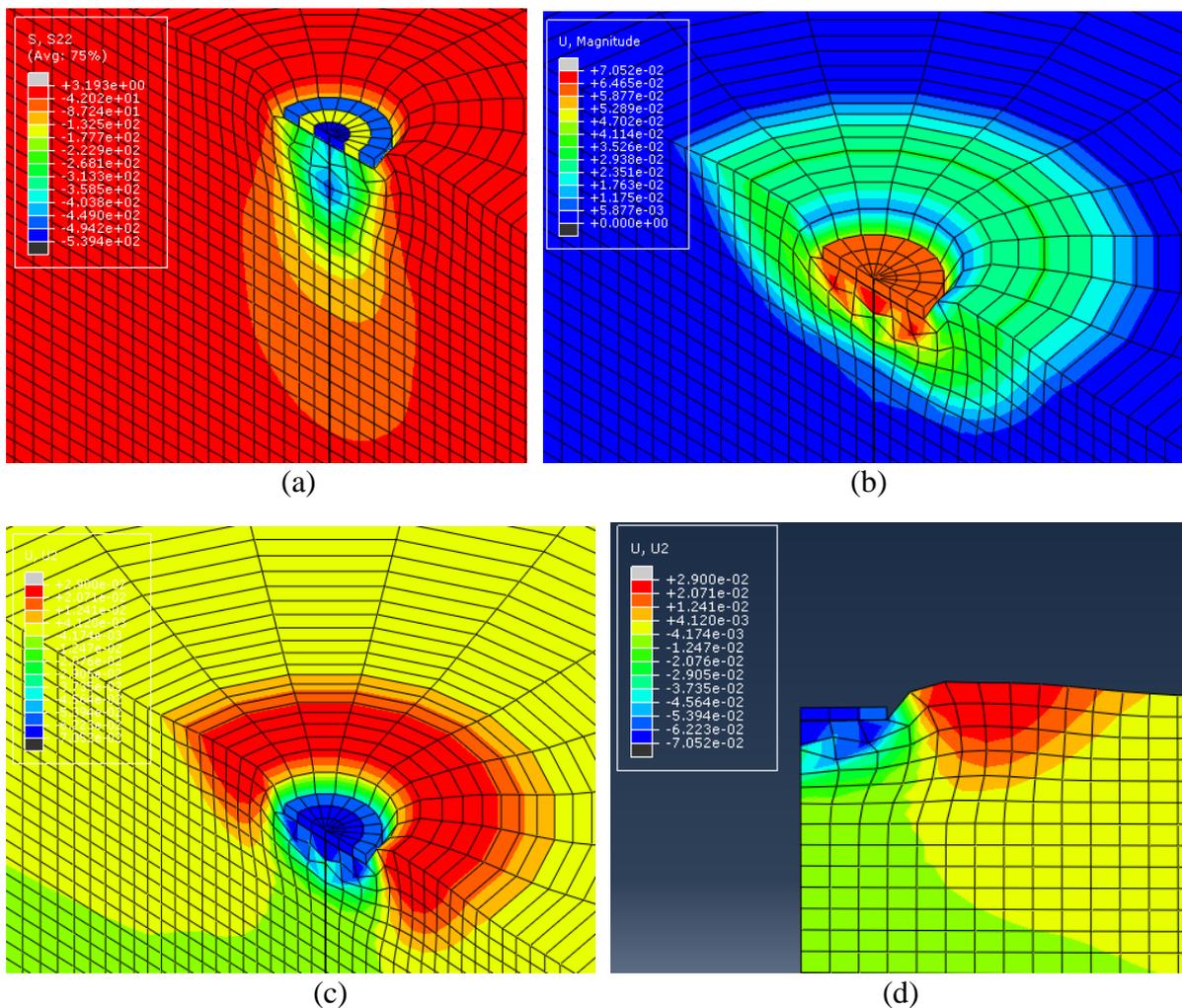
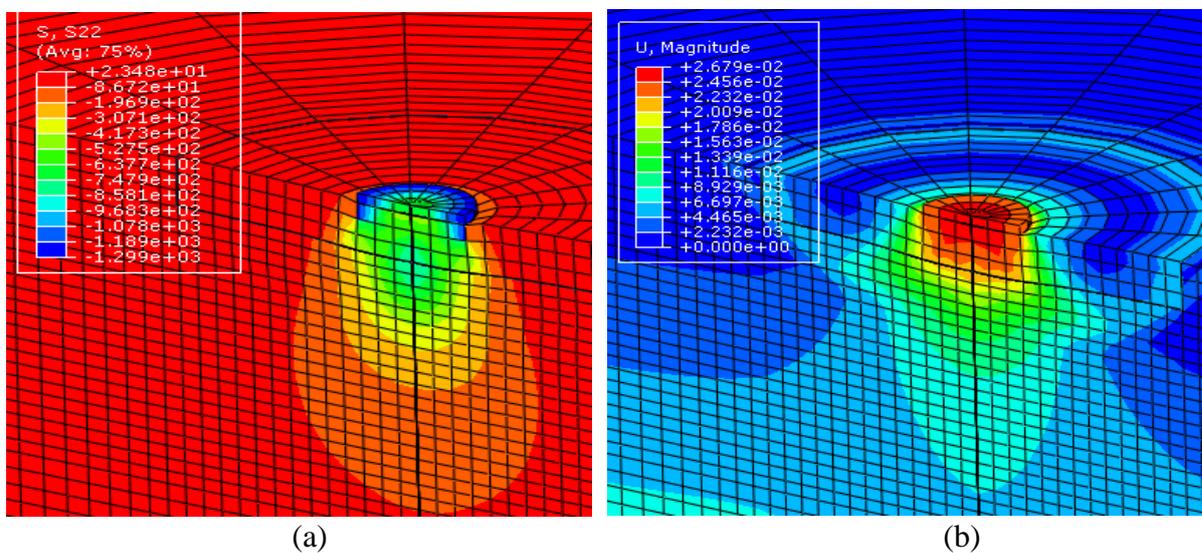


Figura 122 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular ($L = 2000$ mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021)



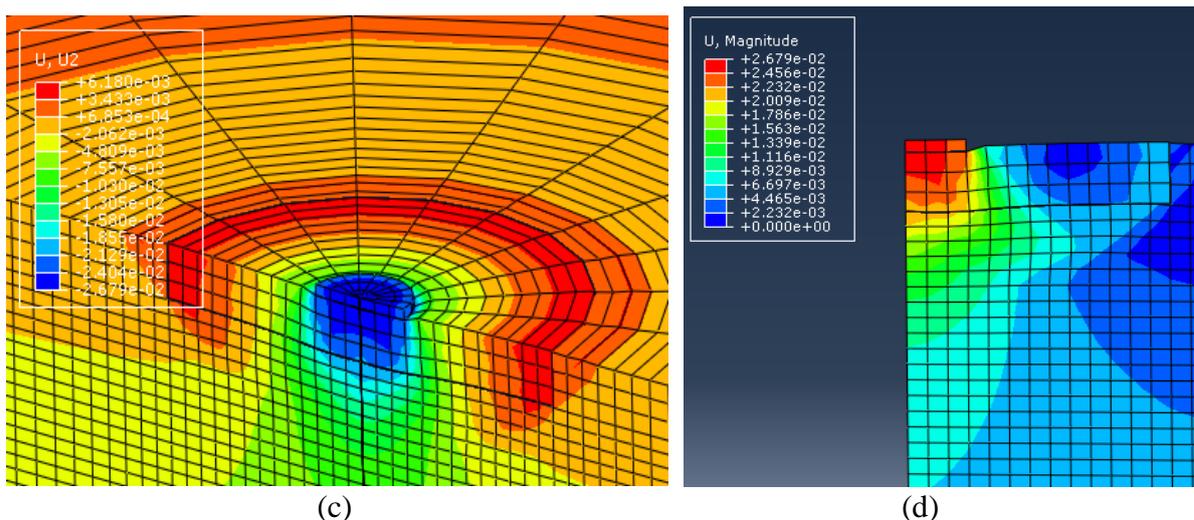
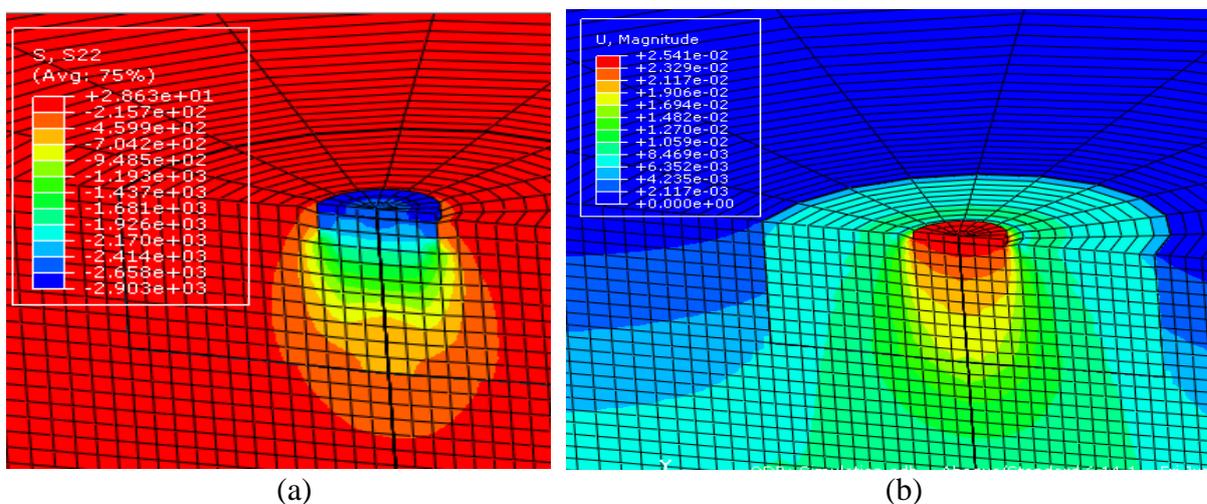


Figura 123 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular ($L = 850$ mm) com camada melhorada ($H_{\text{cam}} = 150$ mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021)

Como a placa utilizada D_{pl} igual a 30 cm, o bulbo de influência atingiu profundidades inferiores a 1,0 m. Contudo, ao introduzir a camada melhorada notou-se um aumento significativo no módulo de elasticidade de campo aliado ao aumento de resistência ao cisalhamento do solo. A Figura 126 demonstra a diferença de capacidade de carga, para critério de ruptura $\delta_{\text{DV}}/D_{\text{pl}}=3\%$, do melhoramento proposto para diferentes espessuras de coluna granular e espessura de camada.



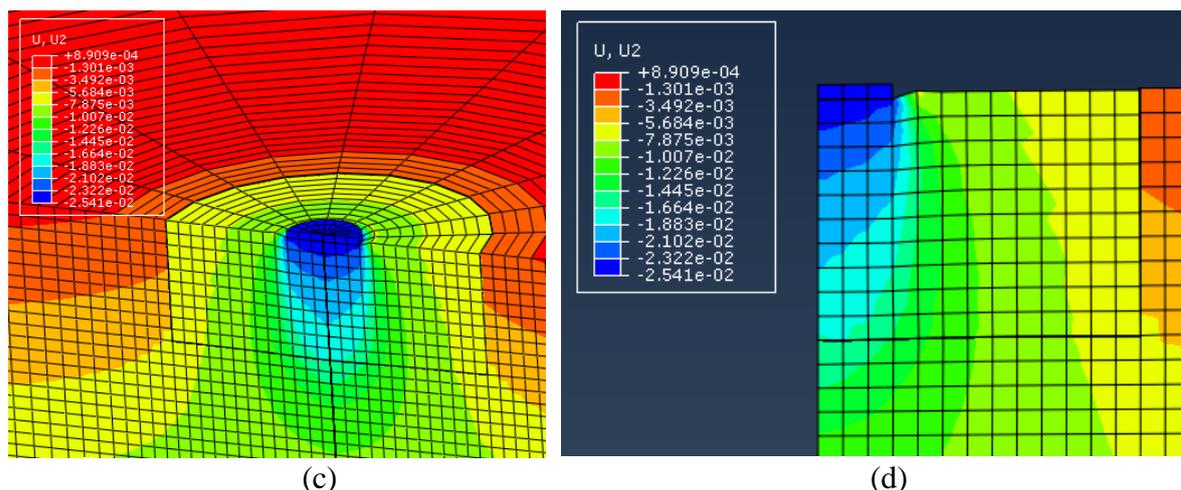


Figura 124 – Modelo axissimétrico 3D em MEF da coluna granular ($L = 500$ mm) com camada melhorada ($H_{cam} = 500$ mm): a) distribuição das tensões verticais; b) deslocamento total; c) deslocamento vertical (vista superior); d) detalhe do deslocamento vertical. (Fonte: Própria, 2021)

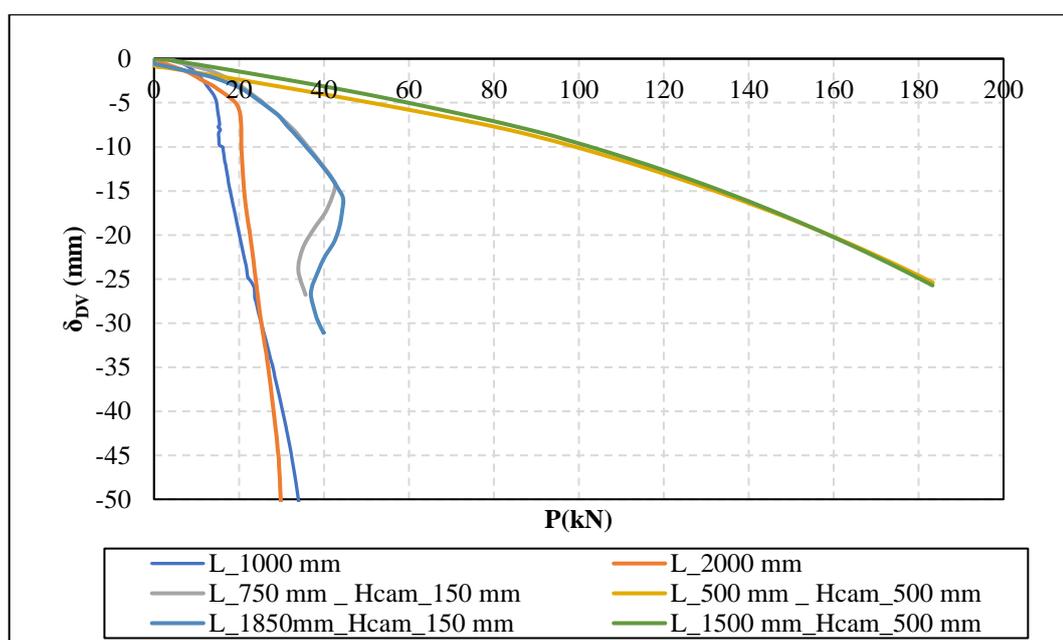


Figura 125 – Estudo comparativo entre as colunas estudadas. (Fonte: Própria, 2021)

No que tange a ruptura, a Figura 126 ilustra graficamente, considerando 3% deformação, que as colunas com ausência de camada melhorada, a coluna L_2000 mm apresentou uma capacidade de carga superior em 25% comparada a coluna L_1000 mm. Contudo, nas demais colunas verificou-se que a espessura da coluna granular não afetou significativamente a resposta resistente do material. Quanto a espessura da camada melhorada, assim como no comportamento P vs δ_{DV} , a capacidade resistente aumentou de forma significativa.

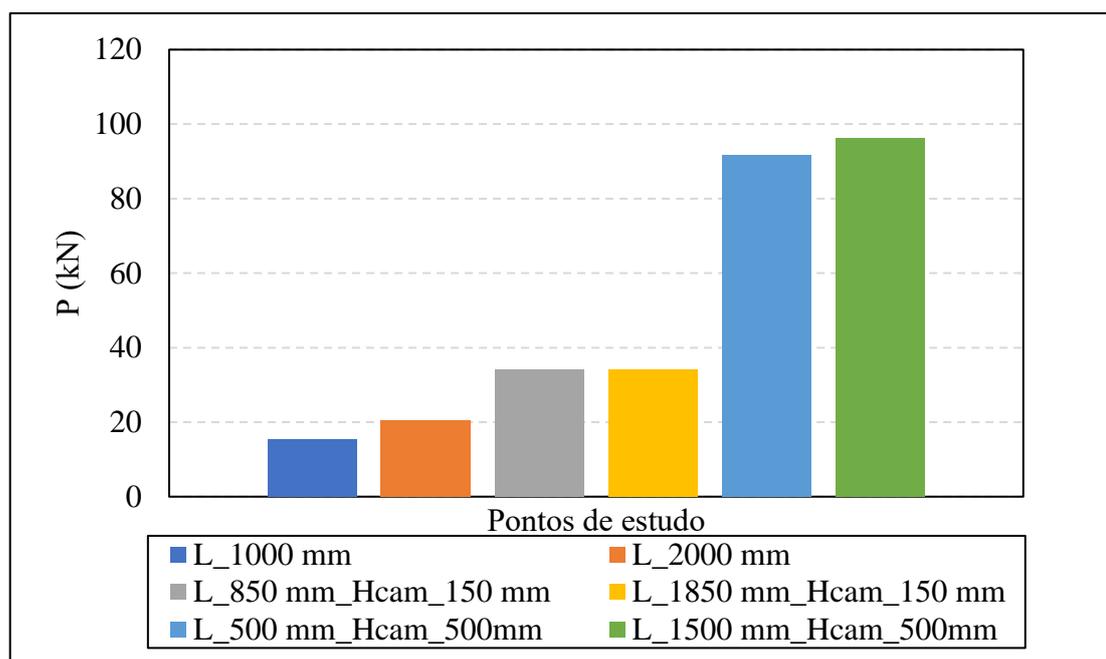


Figura 126 – Avaliação comparativa da capacidade de carga do solo melhorado submetido a diferentes espessuras de colunas e espessuras das camadas considerando o critério de ruptura $\delta_{DV}/D_{pl}=3\%$. (Fonte: Própria, 2021)

5.4.9 Controle de qualidade das colunas granulares

Para controlar a profundidade da cratera foram realizadas medidas das crateras com uso de trena metálica no ponto central da cratera. Após isso, os dados eram registrados conforme a série de golpes ocorriam e assim era possível desenvolver curvas de subsidência induzida vs golpes do martelo. Além disso, a medida em que ocorria o preenchimento da cratera com o material de substituição, eram coletadas amostras de areia de Osório/RS para averiguar o teor de umidade do material.

5.4.10 Construção das camadas melhoradas

Quanto a dosagem da camada de solo melhorado optou pelo melhoramento da Areia de Osório/RS com teor de 7% de cimento Portland CP V ARI-RS, ω da mistura igual a 10% e compactado com γ_d igual a 16,00 kN/m³ para um período de cura de 7 dias. Segundo Cruz (2008), para a areia adotada no estudo, a dosagem escolhida atenderia aos critérios de

viabilidade técnico-econômica, inclusive existem outros estudos na literatura que usam esta dosagem [e.g, Rossi, 2019].

A mistura foi realizada com auxílio de uma betoneira com capacidade de 400 L (ver a Figura 127a). O material foi pesado por meio de uma balança com capacidade máxima de 30 Kg e baldes plásticos. O preparo do solo-cimento seguiu a seguinte ordem de mistura na betoneira: Inicialmente uma parcela de 50% de areia era colocada conjuntamente com toda a massa de cimento CP V ARI RS e misturada, após uns 5 minutos o restante da areia (50%) era adicionado e misturado até a homogeneizar a olho nu. Feita a mistura do material seco adicionava-se toda a água e misturava até homogeneização visual da mistura e assim o processo era finalizado. Antes de o material ser introduzido na cratera e compactado, era realizado um controle de teor de umidade com uso do microondas, conforme ilustrado na Figura 127b e c.

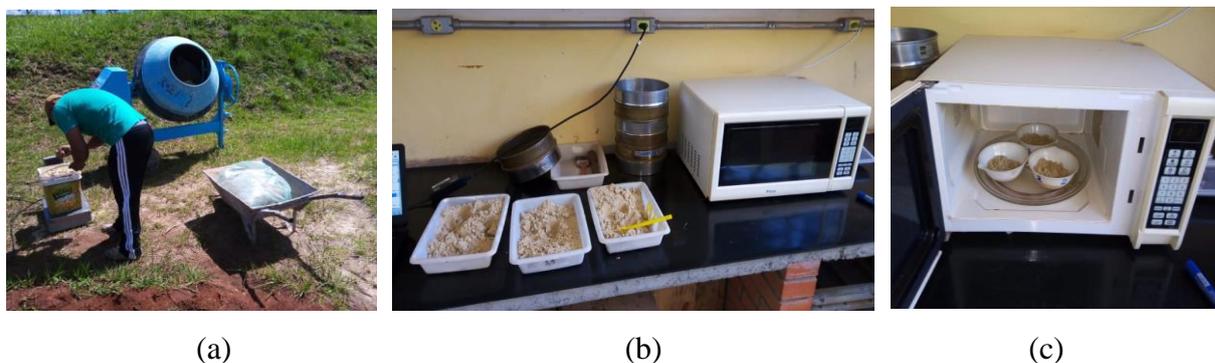


Figura 127 – Mistura e controle da camada melhorada em campo: a) Mistura e homogeneização na betoneira; b) controle do teor de umidade; c) amostras no microondas. (Fonte: Própria, 2021)

Após a realização da homogeneização e avaliação do teor de umidade, a mistura era transportada com uso de carrinho de mão e espalhada no interior da cratera com auxílio de pá e previamente nivelada com leve pisoteamento, como pode ser visto na Figura 128a. Quanto ao adensamento da camada melhorada, o mesmo procedeu com uso de soquete metálico manual realizados em estratos de 100 mm nas camadas de 500 mm (ver a Figura 128b) e em estratos de 50 mm nas camadas de 150 mm (ver a Figura 128c), cujo controle da compactação ocorreu a partir de amostras coletadas com forma biselada e medidas com balança de precisão.

Durante o processo, a camada só era considerada corretamente compactada quando os valores de γ_d das amostras atingissem entre 15,8 kN/m³ e 16,2 kN/m³, ou seja, $16 \pm 0,2$ kN/m³. Após a execução das camadas melhoradas, estas passavam por um período de 7 dias de cura ao ar livre até ser submetida ao ensaio de placa.

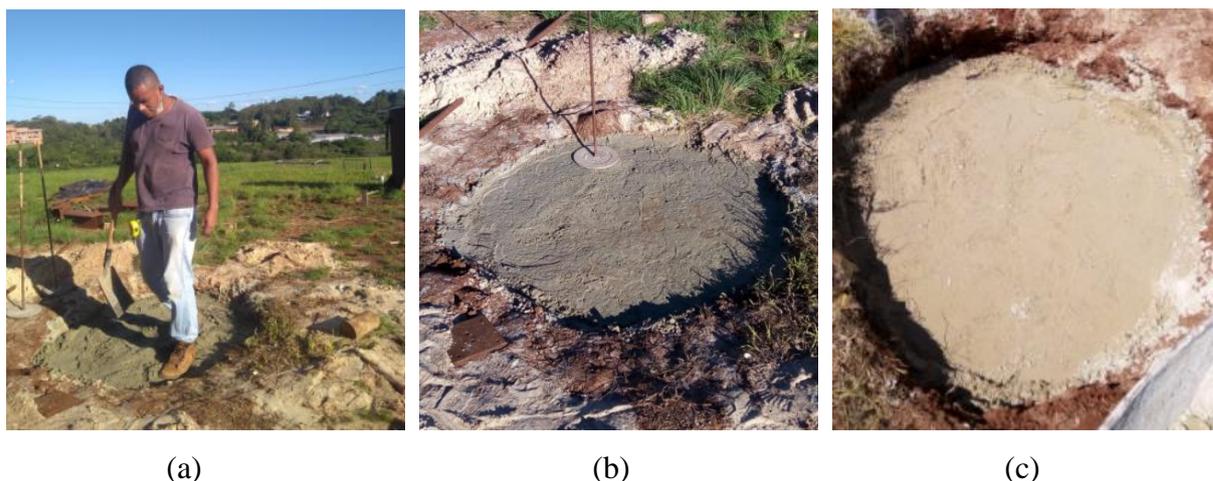


Figura 128 – Construção da camada melhorada em campo: a) Introdução e nivelamento da camada; b) Camada de 500 mm executada; c) Camada de 150 mm executada. (Fonte: Própria, 2021)

5.4.11 Ensaio de Placa – Equipamentos e procedimentos

5.4.11.1 Equipamentos

O ensaio de placa foi realizado com uso de um sistema de pórtico de reação (“*cargueira*”) com capacidade de 180 kN, um macaco hidráulico para aplicação de carga e um sistema de leitura e aquisição de dados. A seguir, na Figura 129, encontra-se ilustrado o sistema de reação juntamente o macaco hidráulico utilizados nos ensaios de campo.



Figura 129 – Sistema de pórtico de reação com detalhamento do macaco hidráulico. (Fonte: Própria, 2021)

Especificamente o sistema de leitura e aquisição de dados foi composto um estabilizador, uma fonte de alimentação com dois canais, um aquisitor de dados, quatro réguas lineares potenciométricas de 50 mm (transdutores lineares) e uma célula de carga de 20 tf, conforme Figura 130. O estabilizador foi utilizado para prevenir as variações de tensões do sistema e a fonte de alimentação foi instalada com o objetivo de transformar a corrente alternada ofertada pela rede elétrica em corrente contínua e assim realizar, uma vez que todo o sistema é composto por elementos de baixa tensão.

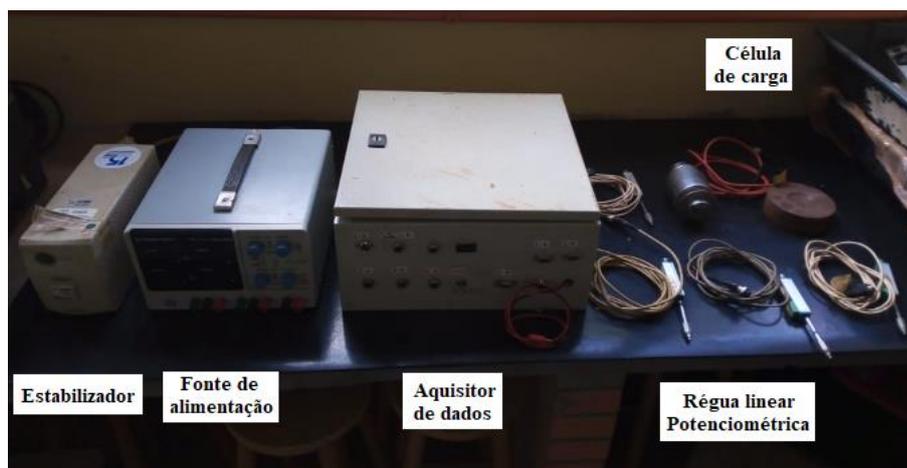


Figura 130 – Sistema de aquisição de leituras do ensaio de placa. (Fonte: Própria, 2021).

Quanto ao aquisitor de dados, com auxílio das réguas potenciométricas e da célula de carga, as leituras de $P(\text{kN})$ vs δ_{DV} (mm) do ensaio foram feitas a cada 5 segundos e armazenadas num arquivo com extensão .TDMS e que podiam ser convertidas em .XLS. Para monitoramento do ensaio, com baixa flutuação da leitura, também foi instalado um extensômetro digital na estrutura metálica de referência.

A Figura 133 ilustra os equipamentos de aquisição de dados de ensaio de placa montados sobre o solo. Antes da realização dos ensaios no campo, todas as réguas lineares potenciométricas e a célula de carga foram submetidas a um processo de calibração, conforme será apresentado no a seguir.

5.4.11.2 Calibração da célula de carga e dos transdutores lineares

Como pode ser visualizado na Figura 131 e Figura 132 foram utilizadas uma célula de carga e quatro transdutores lineares para medidas de deslocamento. A célula de carga foi calibrada com auxílio de uma prensa de ruptura com incrementos de carregamento de 10 kN / ciclo (ver

a Figura 131a), sendo obtida uma excelente correlação gráfica entre a tensão elétrica e a carga aplicada ($R^2 = 0,9999$), como pode ser visto na Figura 131b).

Quanto aos transdutores lineares (ou régua potenciométricas), todos foram calibrados a partir da resposta elétrica (tensão voltagem) do mesmo em função da medida expressa por paquímetro calibrado com incremento de deslocamento de 5 mm. Desta forma, como pode ser visualizado na Figura 132, todos os transdutores apresentaram uma relação considerada excelente, pois o valor de R^2 foi superior a 0,99.

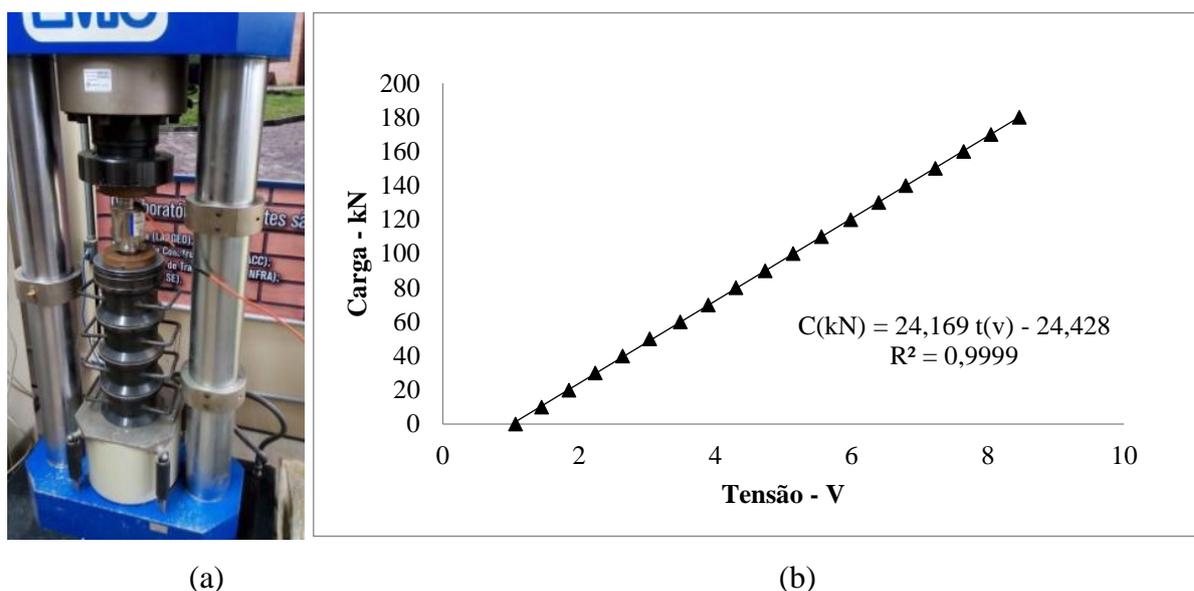
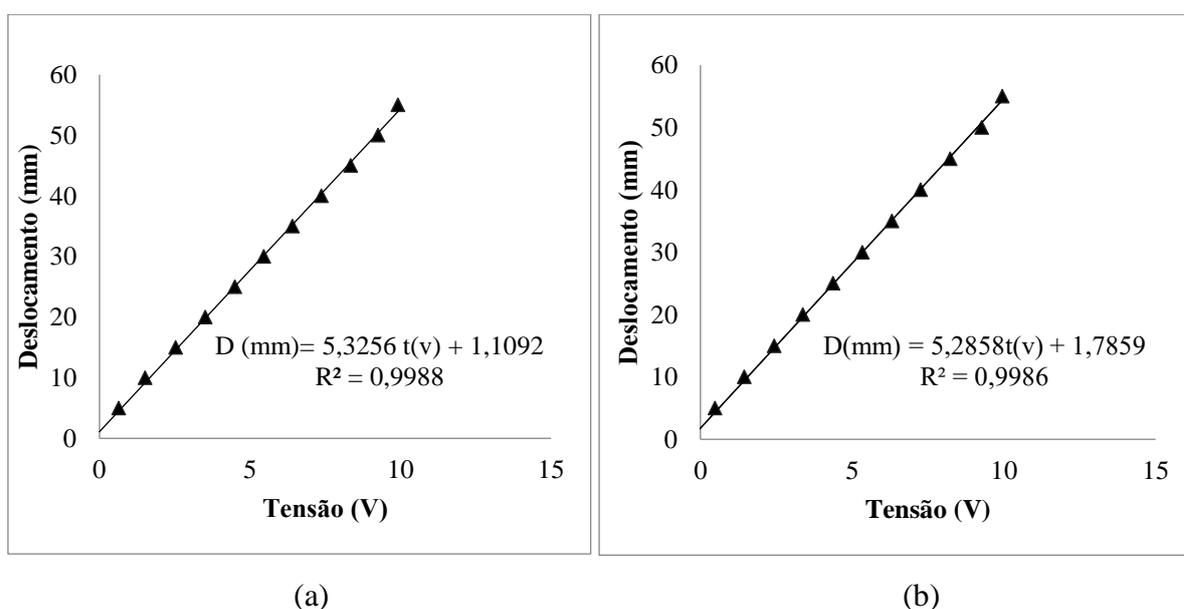


Figura 131 – Calibração da célula de carga. (Fonte: Própria, 2021)



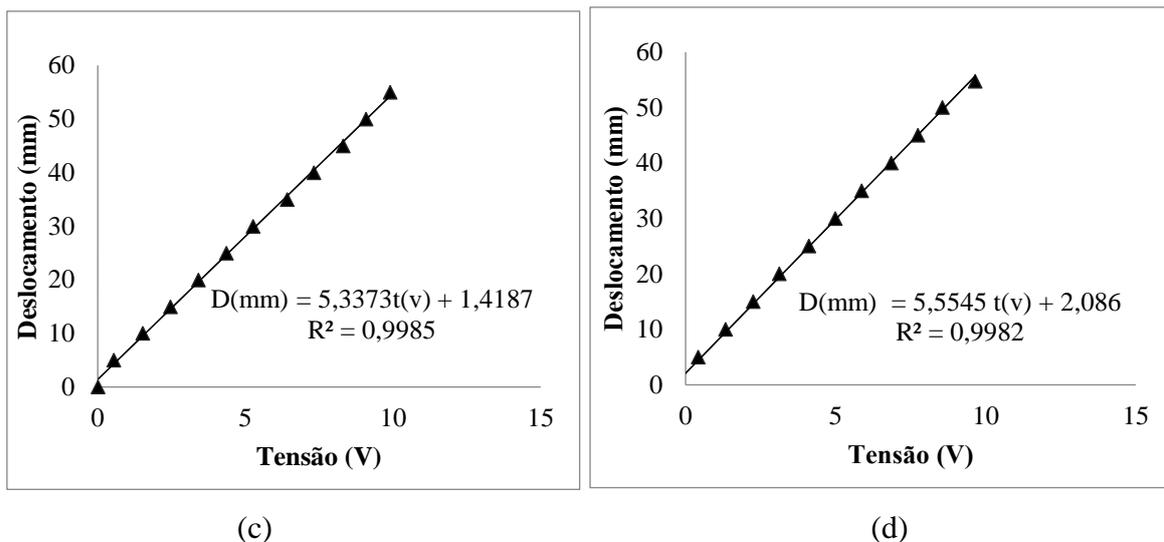


Figura 132 – Gráficos de calibração das réguas potenciométricas: a) Transdutor linear 1; b) Transdutor linear 2; c) Transdutor linear 5; e d) Transdutor linear 6. (Fonte: Própria, 2021)

5.4.11.3 Procedimentos executivos do ensaio

Inicialmente, Figura 133 ilustra todo sistema de aquisição montado em campo baseado nos equipamentos mencionados no item 5.4.10.1. O ensaio de placa foi realizado com carregamento monotônico obedecendo a NBR 6489 (2019) com o objetivo de entender o comportamento P vs δ_{DV} do solo melhorado unicamente por colunas granulares DR e pela combinação de colunas granulares DR e camadas de solo melhorado com cimento sob condições de carregamento estático, com placa de diâmetro de 0,30 m, conforme expresso no programa experimental.

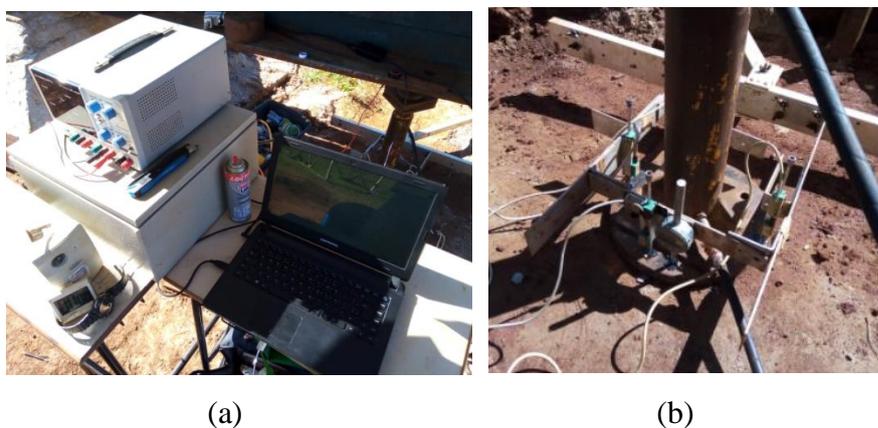


Figura 133 – Equipamentos do ensaio de placa montados: a) Sistema aquisitor + *Notebook*; b) transdutores lineares montados e referenciados. (Fonte: Própria, 2021).

A determinação do diâmetro da placa foi baseada na NBR 6489 (2019), que preconiza que a placa deve ter a rigidez equivalente ao da fundação prevista, seja aço ou concreto, e dimensões mínimas de 0,30 m de diâmetro ou lado (largura ou comprimento). Antes da realização dos ensaios foram introduzidos elementos isolantes (moedas cobertas por fitas isolantes) no contato régua potenciométrica/placa de metal para impedir fuga de tensão e assim evitar imprecisões no sistema.

Após os ensaios foram esculpidos, no mínimo, cinco corpos de prova com dimensões aproximadas de 50 mm x 100 mm (Diâmetro vs Altura), do material da camada rompida e capeados para submissão de ensaio de resistência à compressão simples com velocidade de 1,2 mm/min. De forma complementar, foram coletadas amostras da camada melhorada e realizados ensaios de sucção pelo método do papel filtro com o objetivo de entender a magnitude do efeito sucção matricial na resistência final da camada melhorada, conforme ilustrado na Figura 134.



Figura 134 – Ensaio de sucção: a) amostras de papel filtro separadas por camada; b) amostras sendo pesadas. (Fonte: Própria, 2021)

Assim como nos ensaios de compressão não confinada, foram esculpidos cps (testemunhos) da camada melhorada de 150 mm e de 500 mm para realização de ensaios triaxiais CID com tensões confinantes de 20 kPa, 50 kPa e 80 kPa e velocidade de deformação de 0,08 mm/min a fim de compreender o comportamento de tensão vs deformação, volumétrico e obter os parâmetros efetivos de resistência (c' e φ') das respectivas camadas, conforme Figura 135.

Igualmente às camadas melhoradas, foram também realizados ensaios triaxiais do tipo CID na Areia de Osório/RS com as mesmas tensões confinantes, ou seja, 20 kPa, 50 kPa e 80 kPa e velocidade de deformação de 0,0125 mm/min. Na Figura 136, encontram-se ilustrados os procedimentos de moldagem dos cp's para submissão em ensaio triaxial CID realizados no LABGEO/UFBA.



Figura 135 – Extração de testemunhos da camada melhorada: a) material da camada melhorada de 150 mm rompida; b) corpos de prova embalados para ensaios triaxiais CID e corpos de prova em fase de saturação para ensaio de compressão não confinada. (Fonte: Própria, 2021)

A velocidade de cisalhamento da amostra foi de 0,0270 mm/min para um deslocamento total de 25 mm. A adoção de dois conjuntos amostras se justifica para estimar os parâmetros de resistência do solo intermediários ao estado fofo e medianamente compacto do solo. Devido a ausência de sensor medidor axial de efeito *hall*, as correções da seção transversal dos cps durante o ensaio triaxial foram realizadas a partir do deslocamento vertical conforme houve aumento do carregamento axial, com base na recomendação de Head (1998).

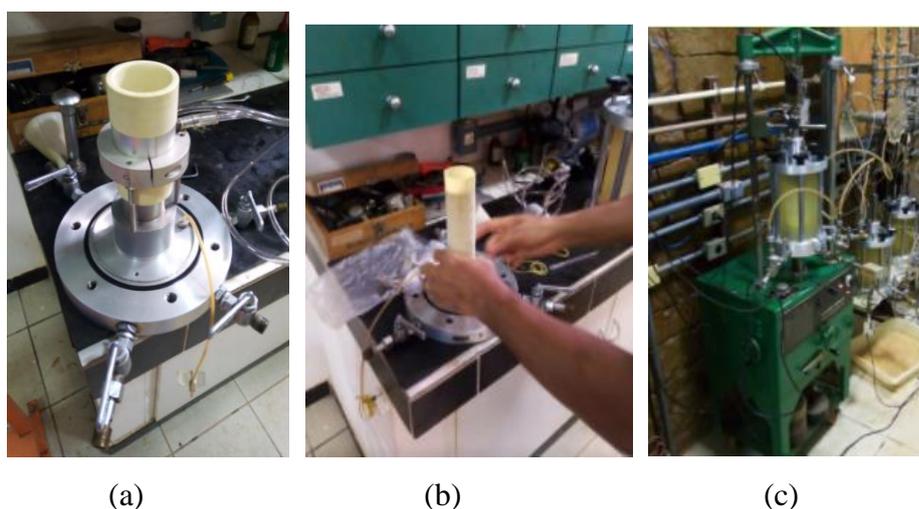


Figura 136 – Ensaio Triaxial CID da Areia de Osório: a) Forma de moldagem do cp; b) cp moldado na bancada; c) Ensaio montado (câmara + prensa). (Fonte: Própria, 2021)

As trajetórias de tensões foram calculadas através dos parâmetros q vs p' (tensão desviatória vs tensão média) com base nas equações (64) e (65):

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (64)$$

$$p' = \left(\frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \right) \quad (65)$$

5.5 EXUMAÇÃO DAS COLUNAS GRANULARES

Para verificação da formação das colunas granulares pós-compactação foram realizados trabalhos de exumação das mesmas. As colunas escolhidas foram as PE-III e PE-IV, justamente as colunas granulares com ausência de camada melhorada e também as mais profundas com intuito de visualização formação de trincas e fissuras e outros comportamentos que viessem a ocorrer, conforme Figura 137a e b. Em seguida, foram retiradas amostras indeformadas do material da coluna com auxílio de cilindro cortante para avaliação do grau de compactidade do material, como pode ser visto na Figura 137c.

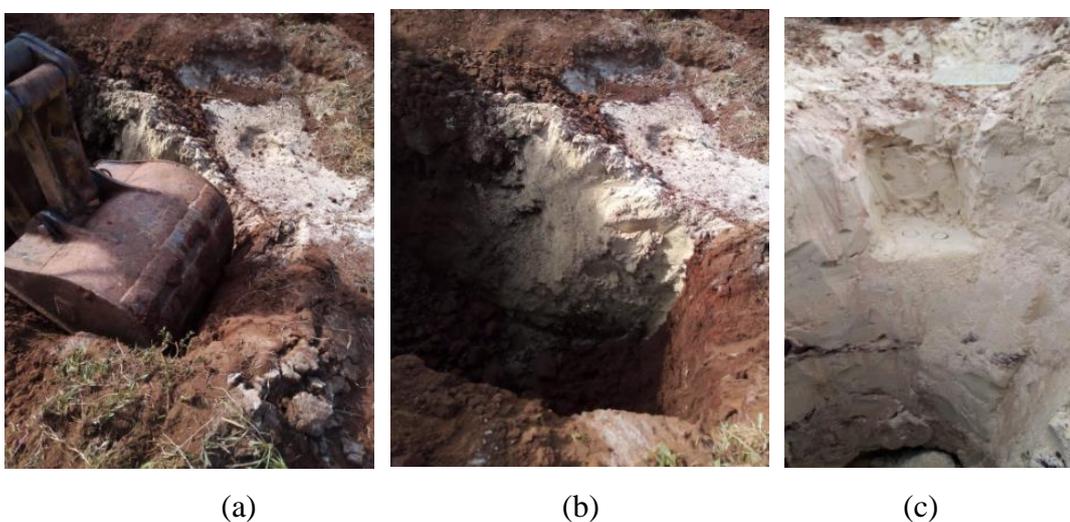


Figura 137 – Atividades de exumação das colunas granulares: a) escavação do solo; b) abertura da vala; c) extração de amostras indeformadas com cilindro cortante. (Fonte: Própria, 2021)

Ao fim da escavação, com auxílio de dois cilindros cortantes com dimensões aproximadas de 5 cm x 5 cm (diâmetro *vs* altura). De posse do volume e massa das amostras, as mesmas foram secas em estufa por um período estimado de 48h a 70°C em função da matéria orgânica presente na amostra. Feito isso, foram determinados os valores de γ_d e comparados com as curvas de compactação do solo laterítico argiloso.

5.6 ENSAIOS DE SPT DAS COLUNAS GRANULARES COM ADIÇÃO DE CAMADAS MELHORADAS

Com intuito de compreender o comportamento da resistência ao cisalhamento do solo ao longo da profundidade, foram realizadas sondagens à percussão SPT com base na NBR 6484 (2001), como pode ser visto na Figura 138.



Figura 138 – Procedimentos executivos do ensaio SPT nas colunas granulares: a) escavação do furo; b) introdução do amostrador na cota de ensaio; c) e material coletado pelo amostrador. (Fonte: Própria, 2021)

Para estes ensaios foram escolhidas as colunas PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI, referentes às colunas com presença de camadas melhoradas, ensaiadas até uma profundidade de 5 m, que na hipótese de carregamento em toda a superfície contemplaria a profundidade da altura da coluna com camada melhorada mais a profundidade máxima de influência do bulbo de tensões ($2 D_t$) que, segundo Barata (1984), representaria a região com presença de tensões equivalentes a 10% das cargas aplicadas. Os ensaios foram realizados no centro da camada por metro.

5.7 VERIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO LATERÍTICO

Após a realização dos ensaios de SPT das colunas dos PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI, foram realizadas atividades de escavação nas respectivas colunas e coletadas amostras indeformadas do solo laterítico do campo para avaliação da compactação da material imediatamente abaixo da coluna granular, conforme Figura 139a. Para tanto, foram extraídas duas amostras de solo

compactado com auxílio de dois cilindros cortantes (ver a Figura 139b) introduzidos manualmente no solo e registradas as respectivas cotas com auxílio de uma trena metálica.



Figura 139 – Coleta de amostra indeformada do solo laterítico de Passo Fundo/RS: a) coleta do material abaixo da coluna; b) material coletado. (Fonte: Própria, 2021)

Ao se obter a amostra indeformada com cilindro cortante, esta era pesada e amolgada para se extrair o teor de umidade. Feito isto, o valor de γ_d foi estabelecido, plotado nas curvas de compactação do solo e posteriormente comparados com os dados de Rizzon (2016), Giese (2019) e Carretta (2018) em estado natural.

5.8 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Após a verificação da importância e respostas dos parâmetros de estudo em modelagem axissimétrica 3D (ver item 5.4.8) partiu-se para a validação do numérico proposto. As simulações numéricas axissimétricas 2D foram validadas através de comparações com os resultados e comportamentos obtidos no ensaio de placa, subsidiando-se dos parâmetros de resistência da coluna granular e da camada melhorada obtidos nos ensaios triaxiais CID da areia de Osório e camada melhorada, ensaios de Giese (2019) e Carretta (2018) calibrados, aplicados no método dos elementos finitos no pacote de *software* ABAQUS®, conforme Figura 140.

O modelo numérico representou o cenário do material granular introduzido e compactado com a camada melhorada aplicada (ver Figura 140a). Não foram realizadas modelagens numéricas considerando os impactos dinâmicos do martelo, em função de complexidades envolvidas na representação fiel do comportamento de densificação do material ao longo da profundidade, ausência de parâmetros representativos do fenômeno dinâmico etc.

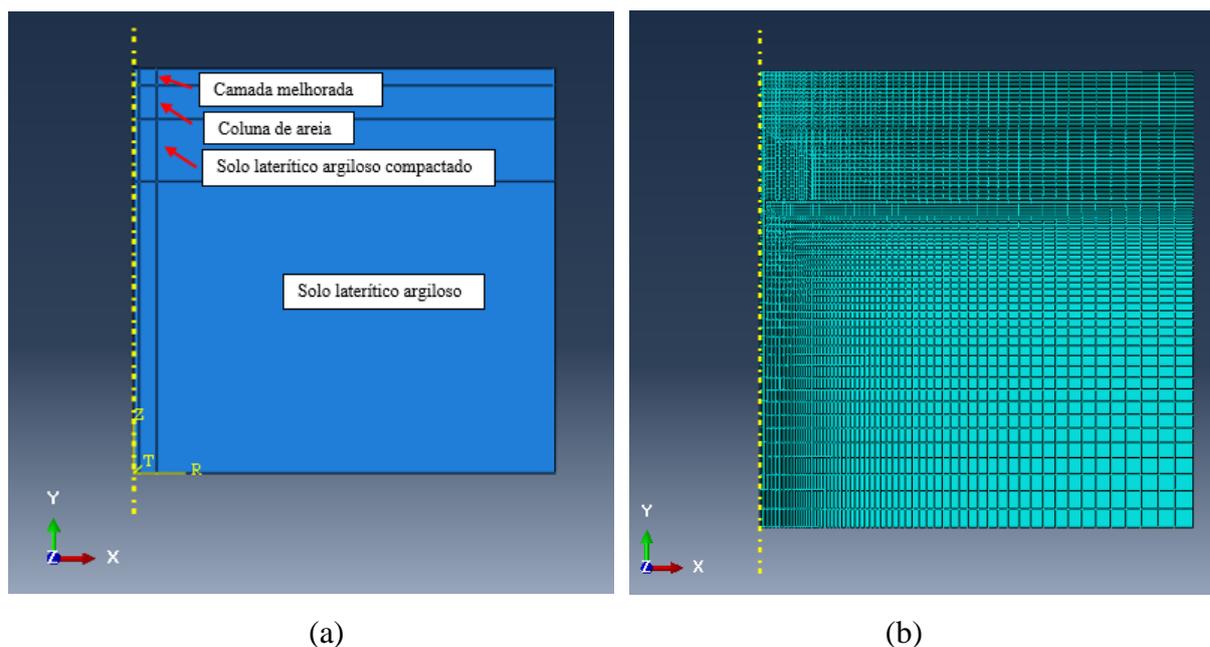


Figura 140 – Modelo numérico axissimétrico 2D exemplo utilizado na avaliação do comportamento do solo: a) Vista transversal do modelo; b) detalhe do refinamento da malha de MEF. (Fonte: Própria, 2021)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados e discutidos todos os resultados realizados nesta pesquisa. A princípio, foram apresentados os resultados e a validação do gatilho experimental. Em seguida, todos procedimentos construtivos (camada melhorada e coluna granular), sequência de ensaios de campo e laboratório. Foram também expostas as respostas do modelo numérico destacando os comportamentos relevantes das simulações. Por fim, a fase de calibração e validação do inclinômetro experimental UFRGS proposto.

6.1 GATILHO DA COMPACTAÇÃO DINÂMICA (*TRIGGER*)

Abaixo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo gatilho quanto aos ensaios laboratoriais e testes de carregamento do conjunto de liberação do martelo de compactação. Inicialmente serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos do aço, em seguida a resposta quanto ao carregamento de tração sofrido pelo corpo do gatilho em prensa e por fim a avaliação qualitativa de abertura do gatilho.

6.1.1 Ensaios de verificação do aço gatilho (*Trigger*)

Após a realização dos ensaios nos corpos de prova do aço SAE 4140 foi percebido, por meio dos resultados da Tabela 27, que o material se encontrava adequado quando comparado aos dados de entrada da simulação computacional, inclusive atingindo valores muito maiores do que o especificado.

Tabela 27 – Resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova do aço SAE 4140 (Fonte: Própria, 2019)

Ensaio	Valores					
	1	2	3	4	5	Média
Dureza (HRC)	45,60	45,48	47,05	48,72	45,02	46,37
Resistência à Impacto (J/Rad)	29,42	29,42	33,34	23,54	32,36	29,62
Resistência à Tração na ruptura (MPa)	1312,37	1337,98	1302,11	1319,34	1327,85	1319,93
Resistência à Tração máxima (MPa)	1402,87	1425,27	1372,69	1402,15	1414,93	1403,58
Limite de escoamento (MPa)	1220,35	1249,99	1247,59	1189,49	1238,19	1225,92
Módulo de Elasticidade (GPa)	220,00	229,36	224,26	236,17	230,90	228,14

Além disso, como pode ser visto na Figura 141, o limite de escoamento do aço atingiu valores entre 1200 e 1400 MPa, ou seja, aproximadamente 65% a 93% superior ao adotado na modelagem do gatilho, acompanhada de ruptura abrupta da amostra. A justificativa desse aumento se deve ao processo de tratamento térmico aplicado ao aço denominado de têmpera, cujo ciclo de aquecimento e resfriamento brusco possibilita um melhor arranjo possível dos cristais com objetivo de elevação da dureza e resistência mecânica do material.

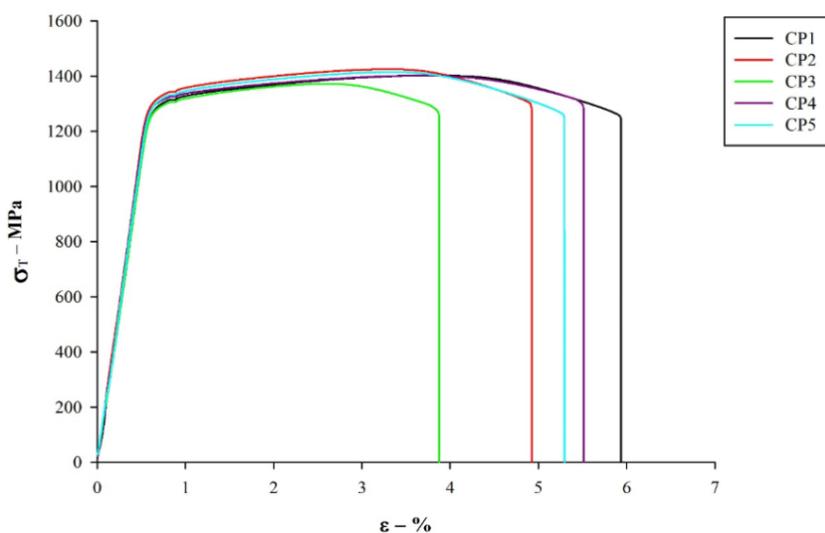


Figura 141 – Ensaios de resistência à tração direta dos corpos de prova do aço SAE 4140. (Fonte: Própria, 2019)

6.1.2 Ensaios de verificação do gatilho (*Trigger*)

Após a realização do ensaio de tração direta no gatilho foi constatado que o corpo do dispositivo, em quatro ensaios realizados, resistiu a esforços de tração de até 80 kN (8tf) aproximadamente sem afetar a integridade da peça. Embora o conjunto tenha atingido deslocamentos grandes (entre 20 mm e 100 mm), conforme apresentado na Figura 142, isso ocorreu devido ao efeito de alongamento dos cabos de tração ancorados na garra da prensa.

Em termos de deformações sofridas pelo gatilho, ao fim dos ensaios estáticos de carregamento estático, em seguida foram realizados estudos referentes ao comportamento de deformação localizada da peça com 2 procedimentos distintos. O primeiro foi realizado por incremento (adição de carga de 10 kN, estabilização e aquisição do valor da deformação) e o segundo por carregamento total (aplicação de 50 kN, estabilização e a aquisição da deformação no final do ensaio). Feito o ensaio, se notou que o comportamento foi de um material no regime elástico e apresentou níveis de deformação semelhantes independente da velocidade do carregamento. No primeiro ensaio foi obtida uma deformação final igual a 439 $\mu\text{m}/\text{m}$ e na segunda a deformação final foi igual a 474 $\mu\text{m}/\text{m}$, como pode ser visto na Figura 143. Esses resultados são compatíveis com as atividades de içamento e liberação em queda livre que o gatilho seria submetido.

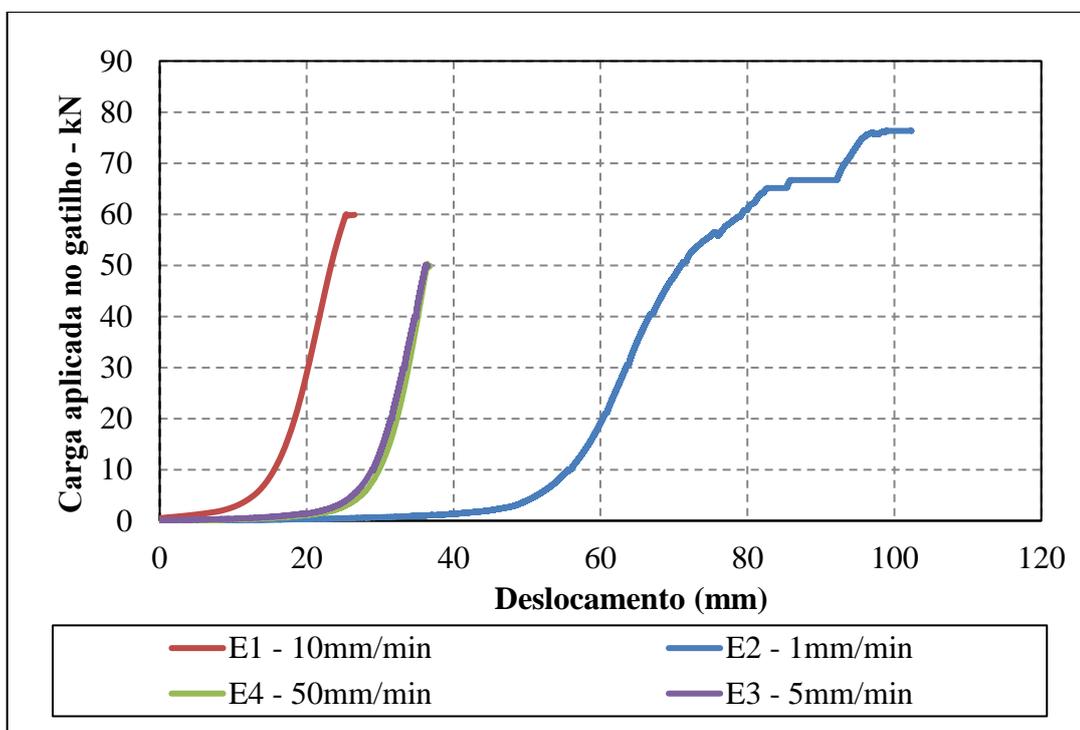


Figura 142 – Ensaios de tração direta do gatilho com as manilhas acopladas. (Fonte: Própria, 2019)

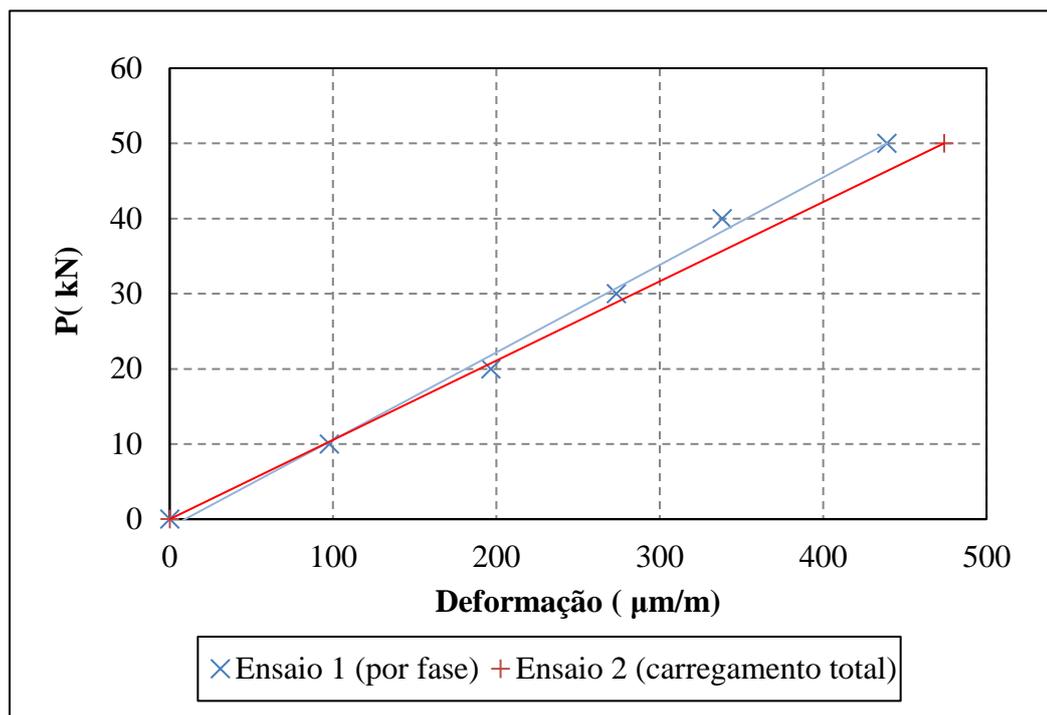


Figura 143 – Deformações elásticas sofridas pelo gatilho em ensaio de carregamento estático. (Fonte: Própria, 2019)

6.2 DESACELERAÇÃO DO MARTELO DE COMPACTAÇÃO

Ao realizar a avaliação de desaceleração do martelo por vídeo com uso do *software Tracker*® foi possível desenvolver interpretações da variação do movimento do martelo, velocidade de queda do martelo, aceleração de impacto e força de impacto em relação ao tempo de filmagem.

Como pode ser visto na Figura 144a, o comportamento do gráfico de variação de altura no tempo se apresenta em formato parabólico. Essa variação é válida pois atende ao previsto pela equação do movimento de um corpo em queda livre da mecânica clássica. A queda do martelo ocorre em um período de 1,25 s atingindo uma velocidade máxima de 12,53 m/s. Ao longo do tempo, o corpo (martelo de compactação) sob aceleração constante, cai com aumento linear de velocidade (ver a Figura 144b) até atingir a superfície, deformá-la e, ao perder energia pelo contato (atrito dinâmica), atinge o estado de repouso. Esta resposta é apresentada graficamente pelos patamares ilustrados na Figura 144a e Figura 144b.

Quanto a duração do impacto, no estudo realizado foi percebido valores na ordem 230 ms, ou seja, levemente superior ao obtido em resultados de areias (100 ms e 200 ms). Oshima e Takada (1994) demonstraram que independente de alturas distintas, o valor da duração da

desaceleração foi praticamente a mesma, algo em torno de 110 ms. Essa conclusão corrobora a hipótese de que o tipo de solo e as condições de compactidade e saturação podem ser parâmetros mais representativos neste fenômeno.

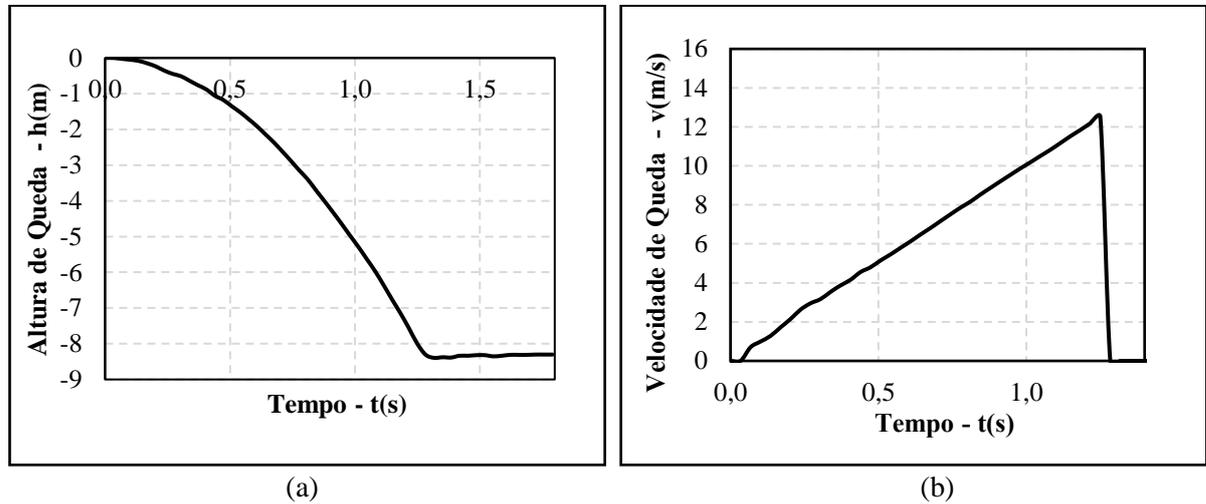


Figura 144 – Respostas do impacto do martelo: a) Variação da altura de queda em relação ao tempo; b) Variação da velocidade em relação ao tempo. (Fonte: Própria, 2020)

Quanto a aceleração de impacto, a desaceleração máxima do martelo foi de $141,85 \text{ m/s}^2$, sendo correspondente a aproximadamente 14,45 G (ver a Figura 145a). Este valor foi superior aos 9 G encontrado por Giese (2019), tal variação pode ser atribuída às condições de densidade de solo e sucção no dia da coleta das medidas, aumentando assim a aceleração normalizada.

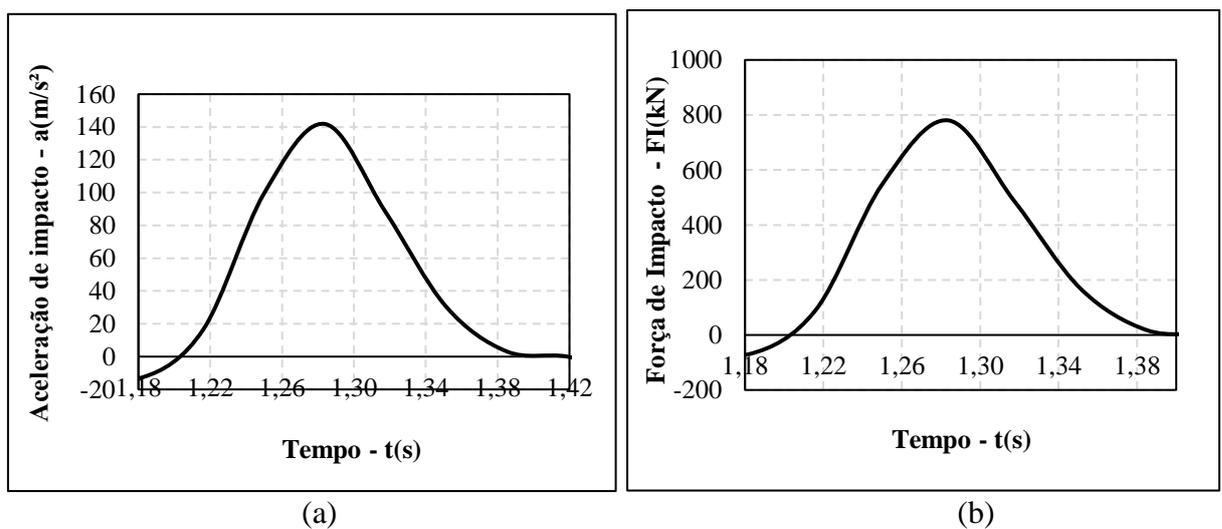


Figura 145 – Respostas do impacto do martelo: a) Desaceleração do martelo em contato com o solo em relação ao tempo; b) Força de impacto em relação ao tempo. (Fonte: Própria, 2020)

Mesmo sendo superior aos dados de Giese (2019), a aceleração G atingiu um valor inferior aos 70 G obtidos por Mayne e Jones (1983) em rejeitos de mineração, 30 G em areias finas siltosas por Holeyman e Vanneste (1987) e 20 a 60 G (em função da altura de queda) obtido por Oshima e Takada (1994), 100 a 200 G em areias médias e densas de Ottawa, respectivamente, e aproximadamente 30 G em aterros granulares densificados em *Gros Cacouna* obtidos por Chow *et al.* (1990).

No que tange a força de impacto máxima obtida foi de 780,2 kN (ver a Figura 145b), sendo aproximadamente 60% superior ao obtido por Giese (2019). Esta força G supera em quase 9 vezes o valor de tensão vertical apresentado por Carreta (2018), sendo plausível confirmar todos os pontos elencados por Giese (2019) quanto à desestruturação do solo (ruptura da cimentação natural e quebra de grãos) e colapso de vazios.

6.3 CONTROLE DE QUALIDADE DAS COLUNAS GRANULARES

Para estimar a quantidade de material necessário por camada, assim como para controle da evolução das crateras no presente estudo foi plotado o comportamento graficamente. Na Figura 146 são ilustradas as curvas de formação das 6 crateras produzidas no estudo e, como pode ser visto, o material apresenta uma certa homogeneização na sua formação em função da sobreposição dos gráficos.

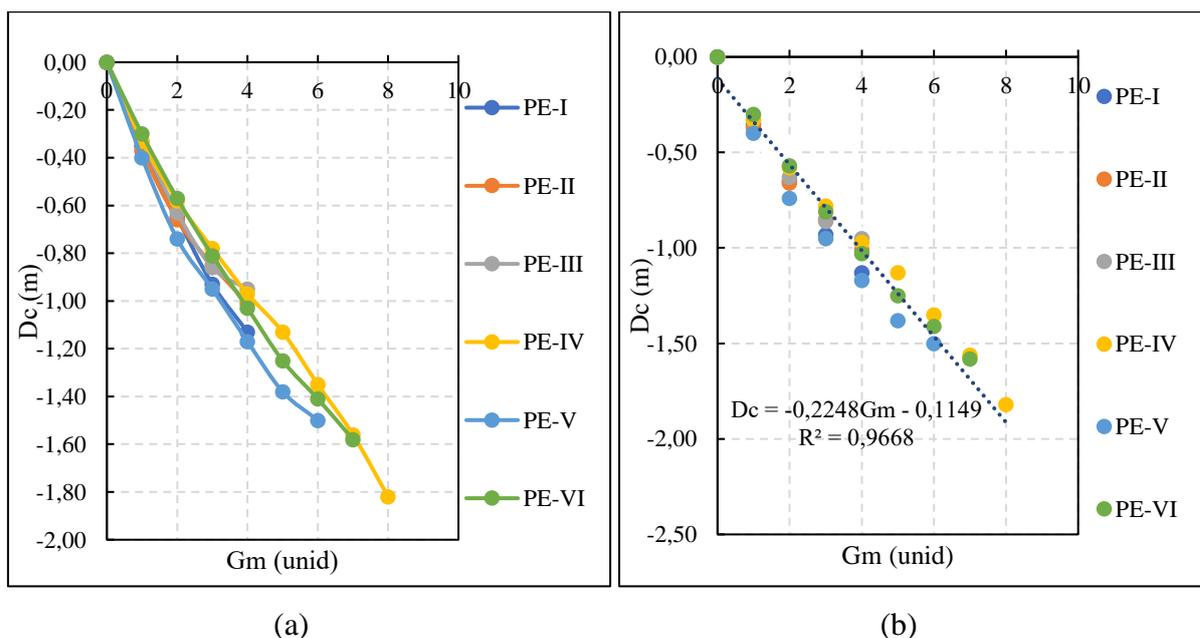


Figura 146 – Subsidiência induzida provocado pelos golpes de martelo de 55 kN: a) D_c vs G_m ; b) Tendência comportamental da evolução da cratera. (Fonte: Própria, 2020)

Em termos operacionais, as pequenas variações estão relacionadas a imprecisão do método de controle da altura, porém existem variáveis não controláveis como magnitude da sucção total, teor de umidade do solo, espessura da capa rígida do solo laterítico local como também ocorrência dos macroporos que de alguma maneira possibilitam mudanças significativas. Ainda assim, percebe-se através da Figura 146b uma boa correlação entre as curvas das crateras ($R^2=0,968$).

Quanto ao teor de umidade, como pode ser visto na Figura 147, a areia no momento que foi utilizada, apresentava um teor de umidade considerado baixo, sendo o PE-I com maior variação (entre 0,22% e 2,87%), portanto o material foi considerado seco.

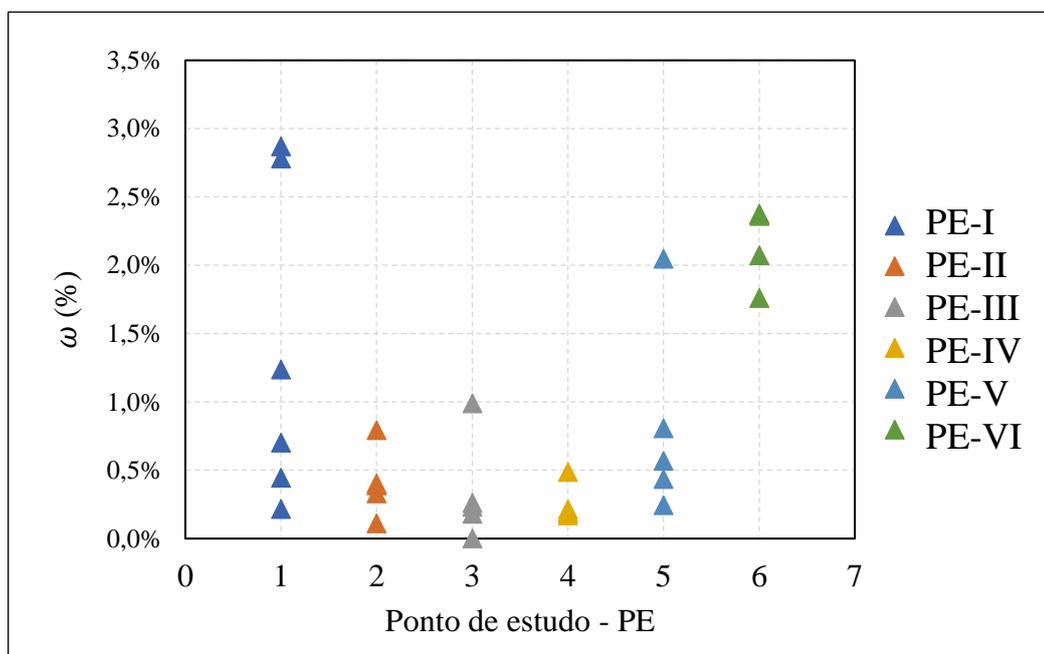


Figura 147 – Medidas de teor de umidade da areia por pontos de estudos (PEs). (Fonte: Própria, 2020)

O acompanhamento do preenchimento da cratera com a areia de Osório/RS foi controlado por camadas x energia acumulada de compactação, ou seja, a cratera era preenchida em camadas de 6 a 10 carrinhos de mão (volume médio de 66,35 l) e posteriormente submetida a uma energia potencial com um martelo de 55 KN liberado em alturas de 3 m em relação a altura da face da camada de areia depositada.

Como não se sabia a resposta inicial do abatimento da areia, as primeiras camadas foram realizadas com a energia de compactação com base em 8 m de altura, porém como foi percebido que o abatimento era maior que o previsto, a energia foi reduzida para quedas de 3m de altura até o final do ensaio e assim mantidos os Lc próximos ao previsto.

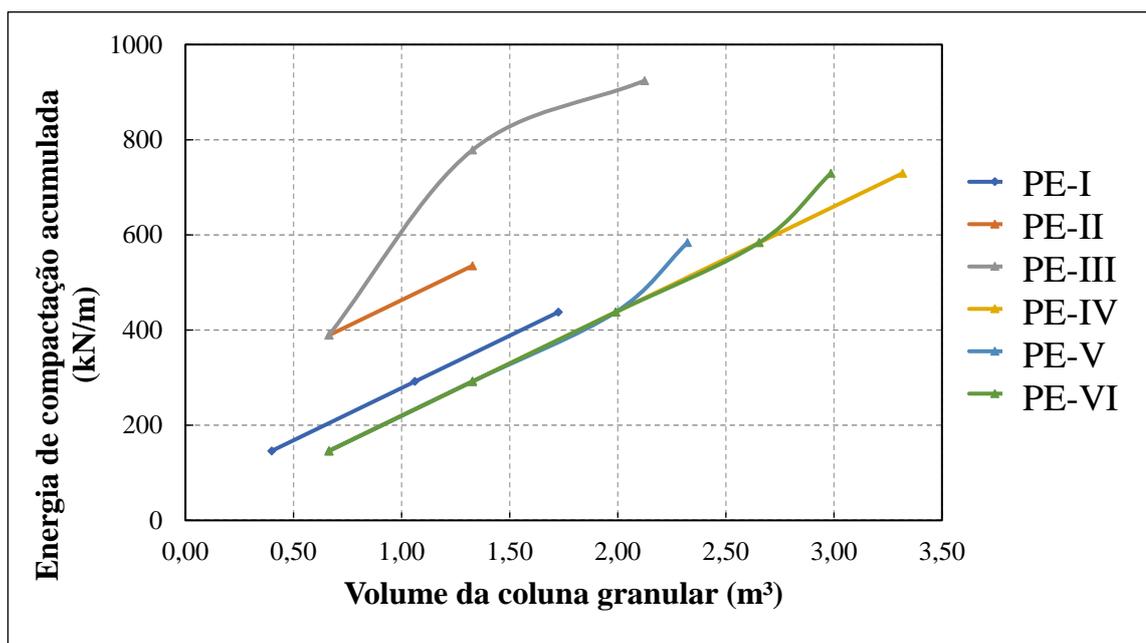


Figura 148 – Relação entre a Energia acumulada de compactação vs volume da coluna granular. (Fonte: Própria, 2020)

Tendo em vista o comportamento indefinido do estado ótimo de compactação, foi então estabelecida a interpretação do ensaio proctor normal do material em função da relação γ_d vs Dr e com isso foi obtida uma excelente reta ajustada ($R^2=0,9998$) com valores de índice de vazios variando entre 0,60 a 0,67 e Dr entre 75% a 100%, como pode ser visto na Figura 149.

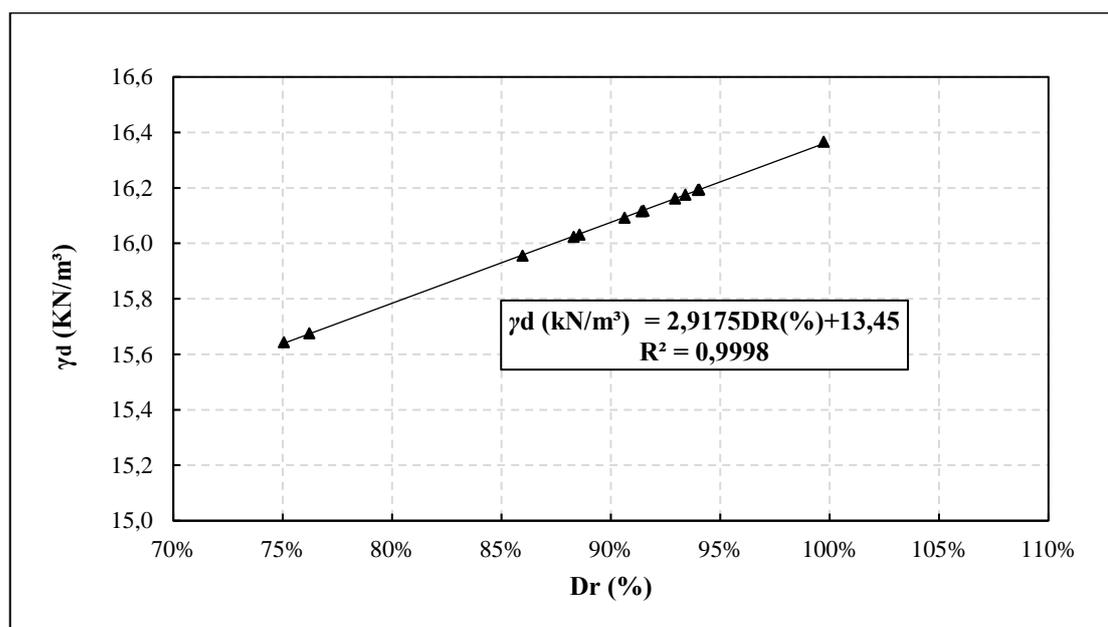


Figura 149 – Relação entre γ_d (kN/m³) e D_R (%) na Areia de Osório/RS para energia Proctor Normal. (Fonte: Própria, 2021)

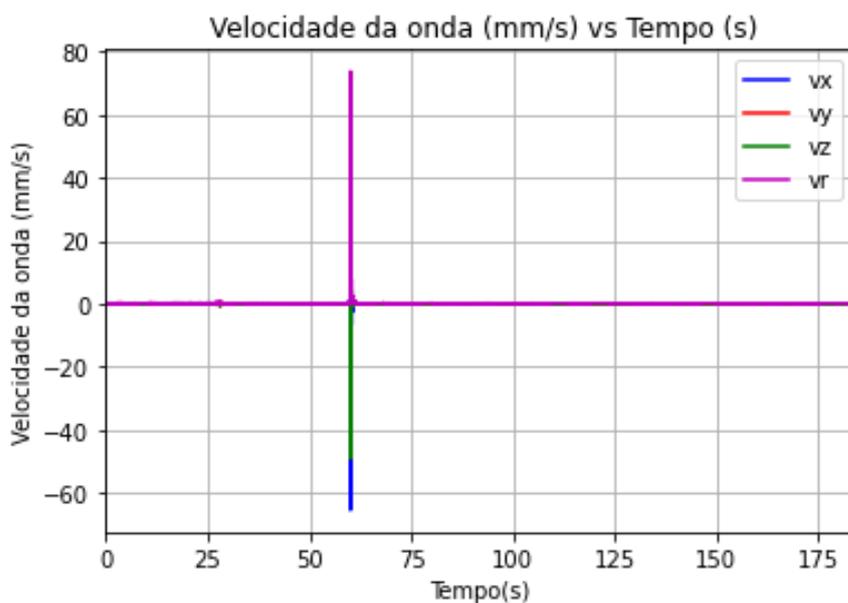
6.4 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DO SOLO

Ao realizar os estudos de medição de vibrações após impacto do martelo sobre o solo laterítico de Passo Fundo/RS alguns aspectos foram observados. Assim como Hwang e Tu (2005), as ondas verticais e radiais apresentaram respostas de vibração típicas sob um forte impacto, no entanto, a forma da onda tangencial era mais complexa. Os picos de alta frequência na parte frontal das formas de onda atenuavam rapidamente com a distância em todas as três direções, mas os picos de baixa frequência na parte posterior das formas de onda atenuavam mais lentamente com a distância.

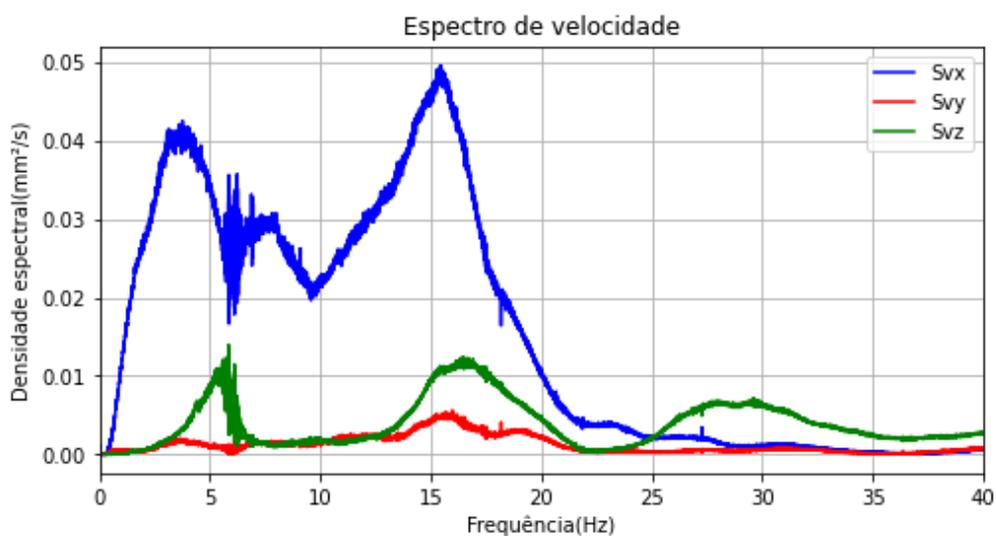
Abaixo estão ilustradas as respostas de velocidade das ondas no sentido radial, tangencial e vertical referentes a V_x , V_y e V_z , respectivamente. Além disso, foi também calculada a V_r referente ao *PPV*, bem como as frequências das ondas nos três sentidos com base em *PSD*. Através do *PSD* é possível realizar a análise de sinais aleatórios e assim compreender a densidade de energia para cada faixa de frequência, assim como descrever a variação dos sinais é distribuída no domínio da frequência.

Entre a Figura 150 a Figura 152 foram diligenciados para queda em 3m de altura (Ensaio I a III). Inicialmente, a Figura 150a ilustra que o valor do *PPV* do ensaio I foi igual a 73,80 mm/s, de forma que os valores da velocidade apresetam maiores modulos na sequênciã V_x , V_z e V_y . Como pode ser visto Figura 150b, as frequências de maior energia de vibração foram de aproximadamente 15 Hz em na direção X e Y e de 5 Hz na direção Z.

Quanto a Figura 151, o valor do *PPV*, como previsto, apresentou um valor inferior ao mencionado na Figura 150. De maneira consagrada, à medida que há afastamento do ponto de impacto, ocorre defasagem da ondas pela dissipação de energia no meio em função do atrito e do amortecimento do golpe. Especificamente neste caso (ensaio II), o valor do *PPV* foi de aproximadamente 30 mm/s, o que representa uma redução de 60% comparada à medição realizada em 3,6m. Em relação às frequências, percebe-se que os valores das frequências máximas no sentido X, Y e Z foram de aproximadamente 14 Hz, 10 Hz e 5 Hz, respectivamente. Esses valores são similares aos apresentados no ensaio I, sendo um comportamento homogêneo de certa forma.



(a)



(b)

Figura 150 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 3m de altura medidas à 2,6m de distância do eixo da fonte em 1º golpe: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

A Figura 152 ilustra o ensaio III, nesse caso o valor do *PPV* foi igual a 28,81 mm/s representando uma baixa defasagem comparada ao dado anterior (menos de 10%), sendo as maiores velocidades a V_x , V_z e por fim V_y . Em relação às frequências percebe-se que nas direções X, Y e Z os valores foram de aproximadamente 11 Hz, 36 Hz e 5 Hz, respectivamente. Embora diminuta a diferença, nota-se que na foram mais altas, indicando que em ambas as

frequências ocorreram as maiores liberações de energia. Nota-se uma similaridade na magnitude das frequências de maiores energias para uma mesma energia de impacto, embora ocorressem medições em distâncias distintas.

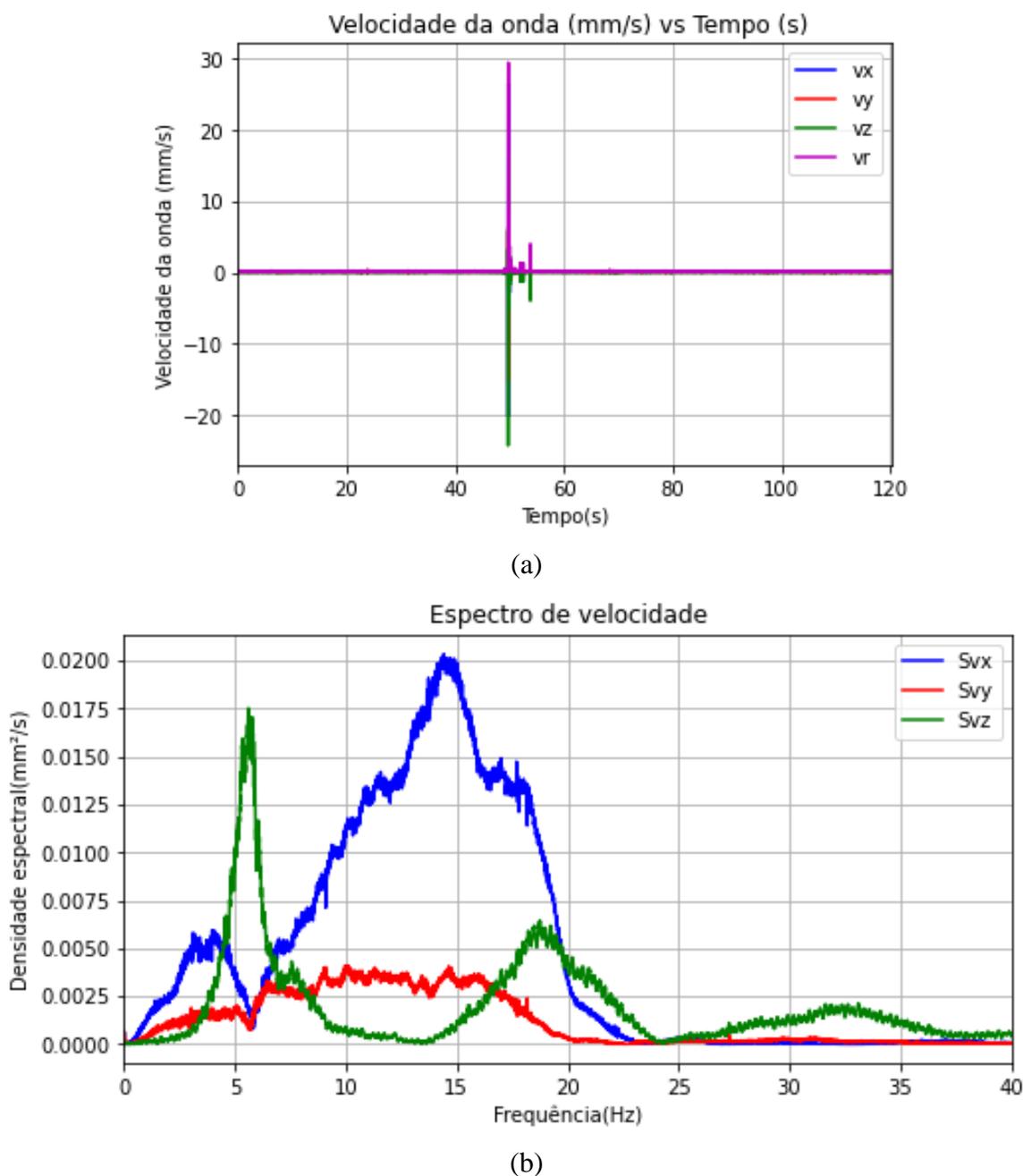
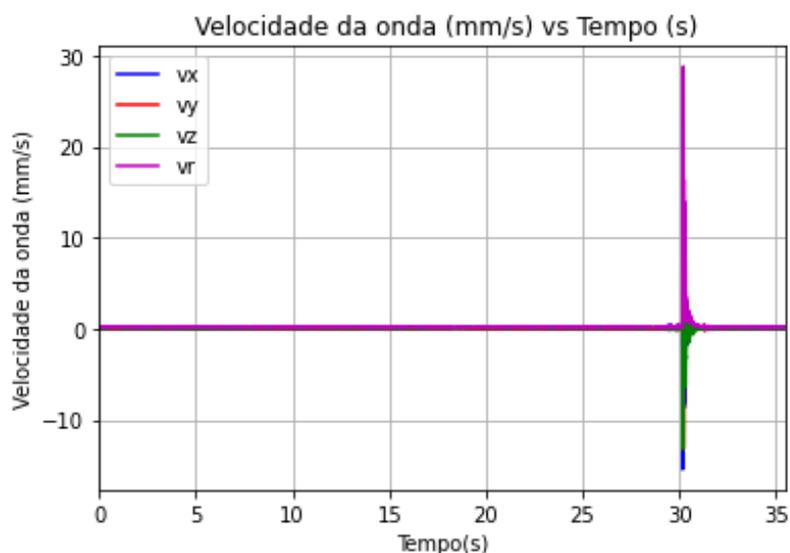
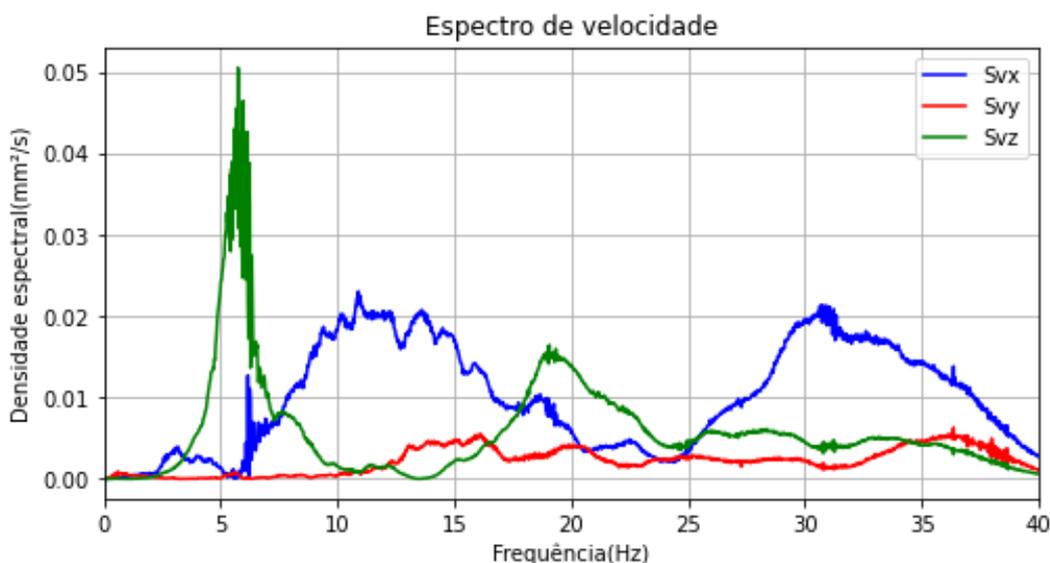


Figura 151 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 kN solto à 3 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte em 1º golpe: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)



(a)



(b)

Figura 152 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 3 m de altura medidas à 6,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

Ao elevar o martelo de compactação para altura de 5 m foram produzidos os gráficos referentes as Figura 153 a Figura 155 (IV a VI). Na Figura 153a (ensaio IV) ilustra que o valor do PPV foi igual a 94,52 mm/s superando em 28% ao valor do PPV da Figura 150 que se encontrava na mesma distância. Em termos do módulo de velocidade, $V_x > V_z > V_y$, já em relação a avaliação das frequências (ver a Figura 153b) foi visto que na direção radial o valor foi 3,3 Hz como frequência de maior energia, na direção tangencial igual a 14,96 Hz e na

direção vertical igual a 15,80 Hz. Contrariamente, ao visto nos estudos de 3m de altura, as frequências na direção tangencial e vertical tiveram respostas de frequências muito próximas.

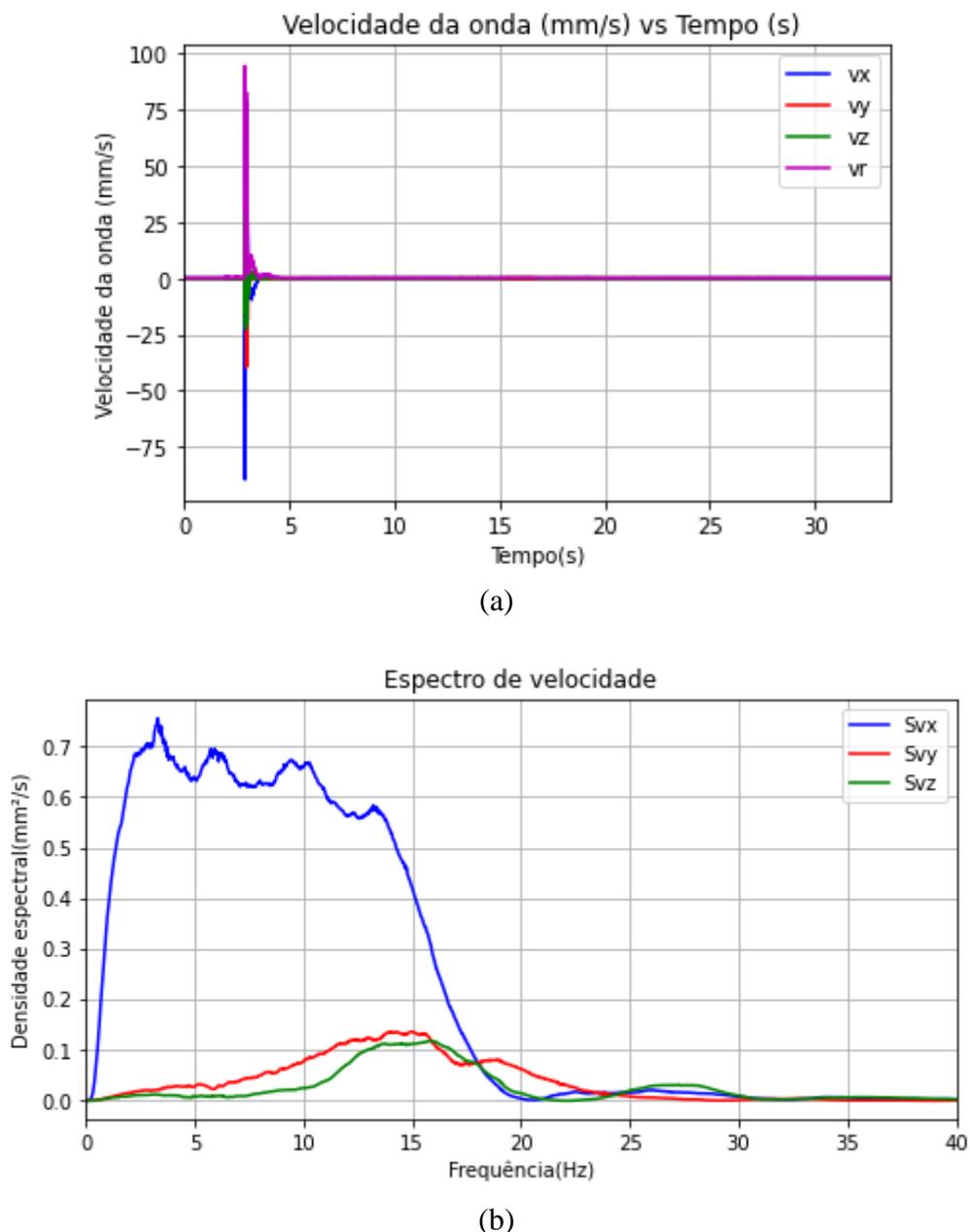
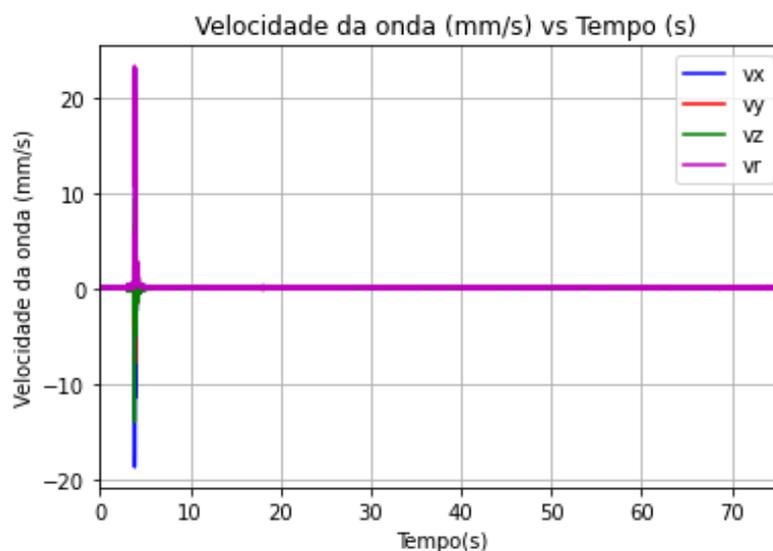


Figura 153 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 5 m de altura medidas à 2,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

Na Figura 154a (Ensaio V), são verificadas as medidas em relação à 4,6 m e como previsto houve uma significativa redução do *PPV* (23,40 mm/s) comparado a Figura 153a, sendo novamente $V_x > V_z > V_y$. A Figura 154b ilustra que as frequências de maior energia estão entre 5Hz e 15 Hz considerando as ondas nas três direções.

Quanto às medidas em relação a 6,6 m para altura de queda de 5 m, a Figura 155a (ensaio VI) demonstra que o *PPV* sofreu uma leve queda comparado a distância de 4,6 m, cujo valor foi 19,16 mm/s. As ondas se comportaram semelhantemente a sequência dos outros ensaios ($V_x > V_z > V_y$) e as frequências de maior energia nas três direções estiveram entre 5 Hz e 28 Hz, salientando que o valor de *PSD* da onda tangencial manifestou como frequências principais 17 Hz e 28 Hz.



(a)



(b)

Figura 154 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 kN solto à 5 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

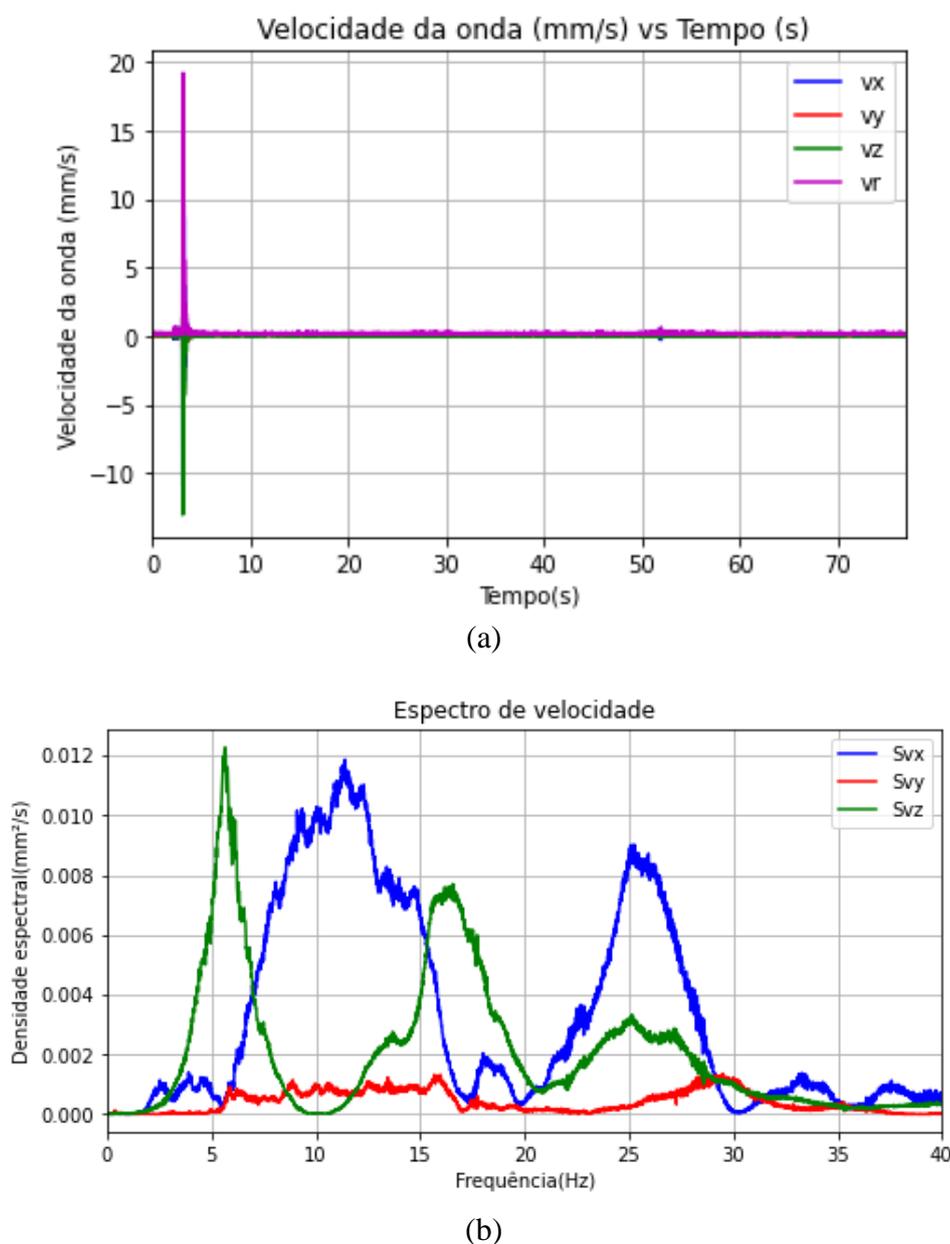


Figura 155 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 kN solto à 5 m de altura medidas à 6,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

Ao elevar o martelo de compactação para altura de 8 m foram produzidos os gráficos referentes as Figura 156 a Figura 158 (VII a IX). A priori, para a distância de 2,6 m foi percebido que a velocidade da onda da Figura 156a atingiu a velocidade limite de captação de ondas vibratórias do sensor 100 mm/s), talvez a velocidade de propagação medida seja menor do que a velocidade de propagação real, contudo a *PPV* foi igual a 117,43 mm/s com o mesmo comportamento padrão de velocidade ($V_x > V_z > V_y$). Quanto as medidas das frequências de

maior energia, foi percebido que nas três direções os valores foram muito próximas, na faixa de 11 Hz a 13 Hz.

A Figura 157a (ensaio IX) demonstra a resposta intermediária do *PPV* para a altura de 8m de queda, o valor foi igual a 85,87 mm/s com mesmo comportamento padrão de magnitude da velocidade dos demais ensaios ($V_x > V_z > V_y$). Em relação à frequência (ver a Figura 157b), percebe-se que as frequências de maior energia estão entre 9 Hz e 17 Hz.

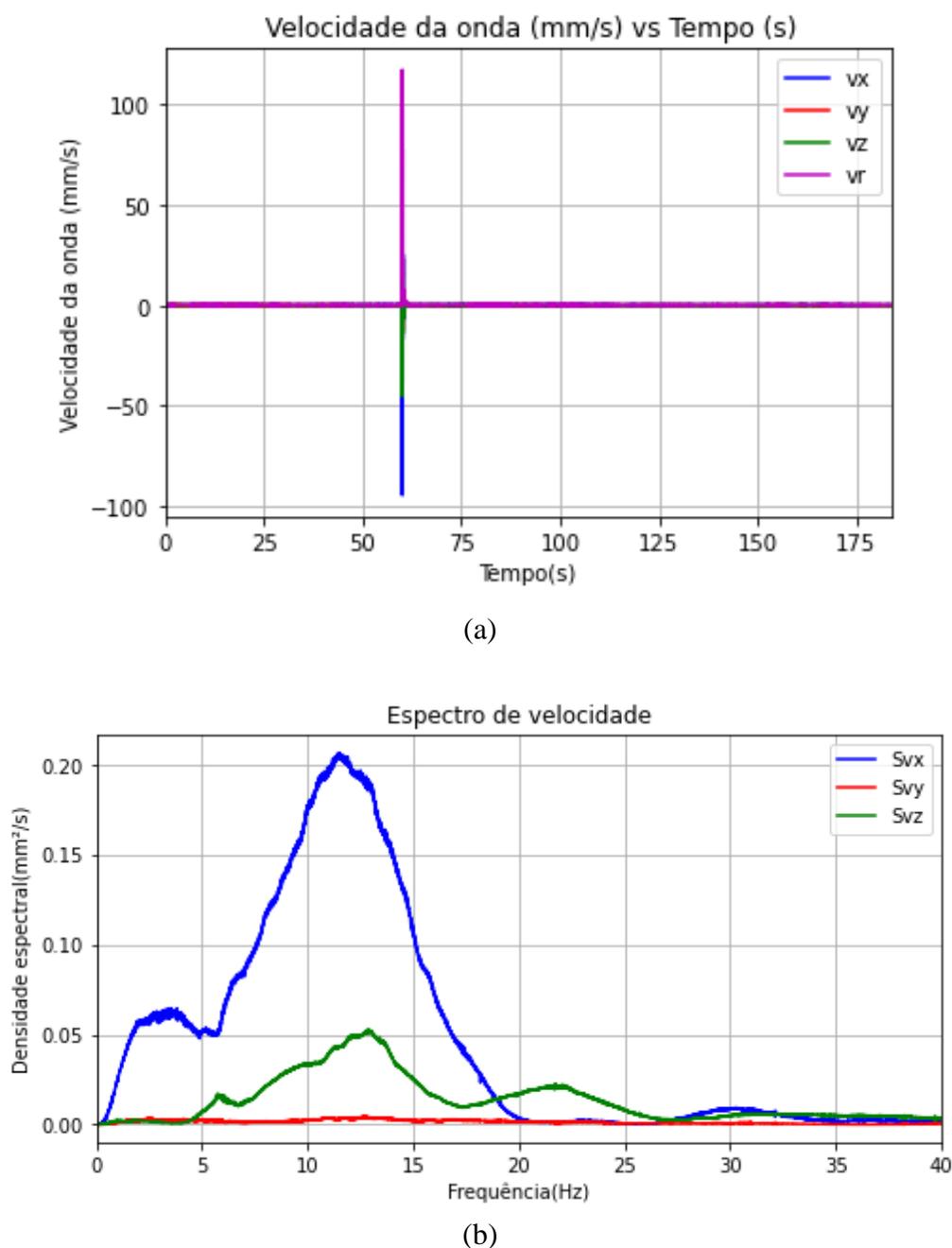
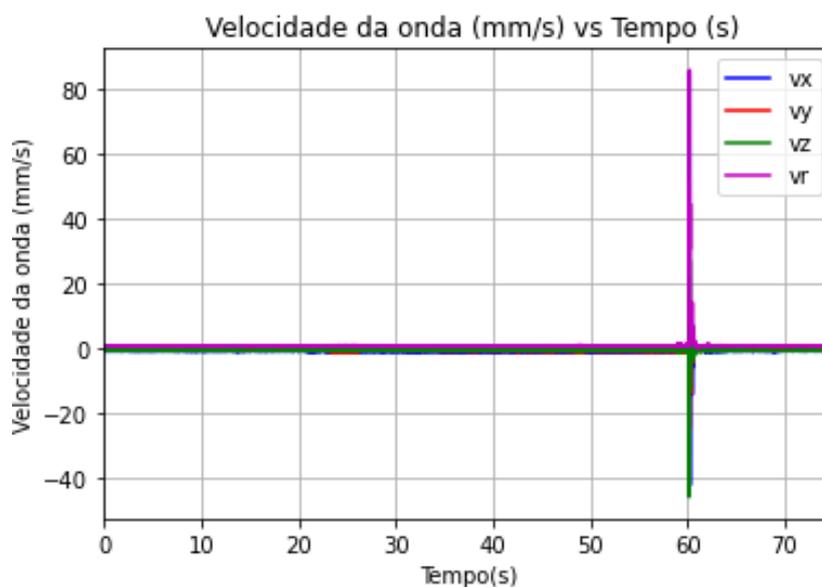
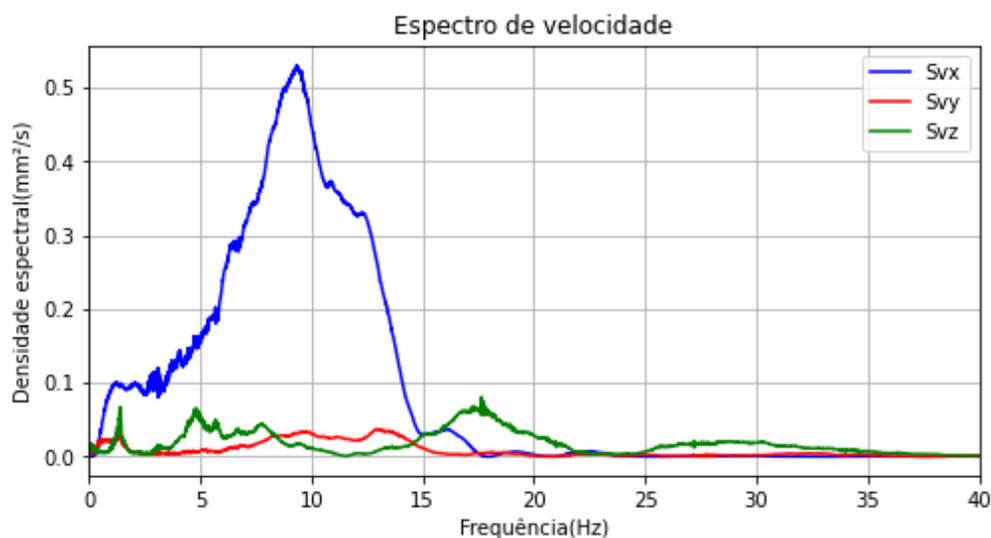


Figura 156 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 kN solto à 8 m de altura medidas à 2,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)



(a)



(b)

Figura 157 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 kN solto à 8 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

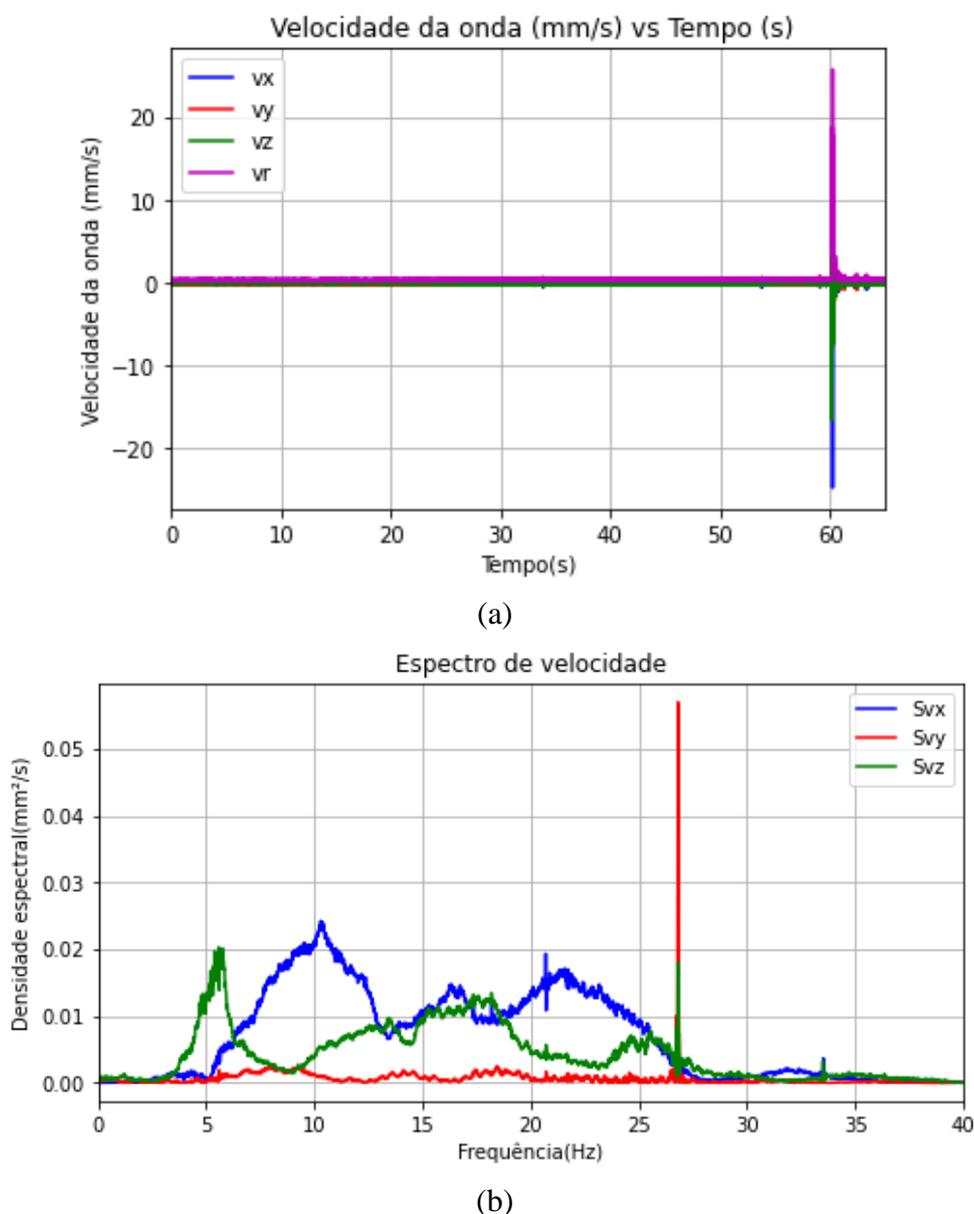
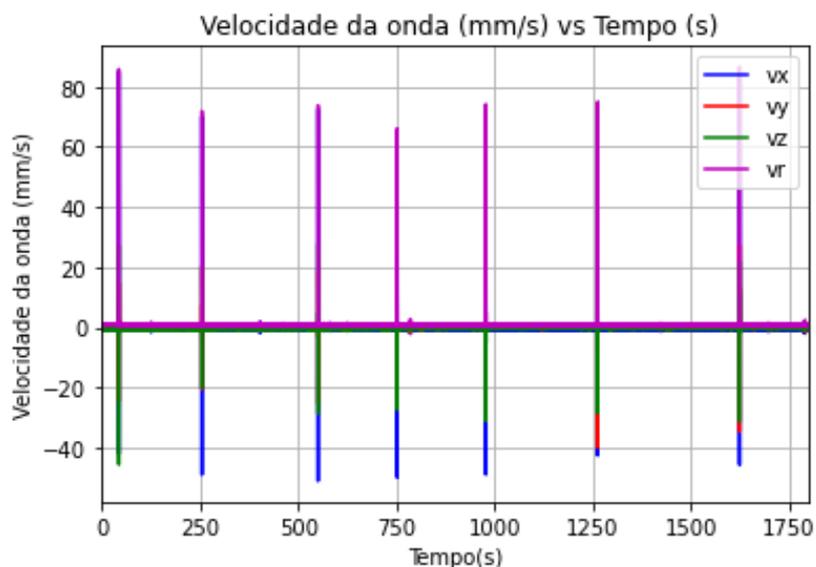


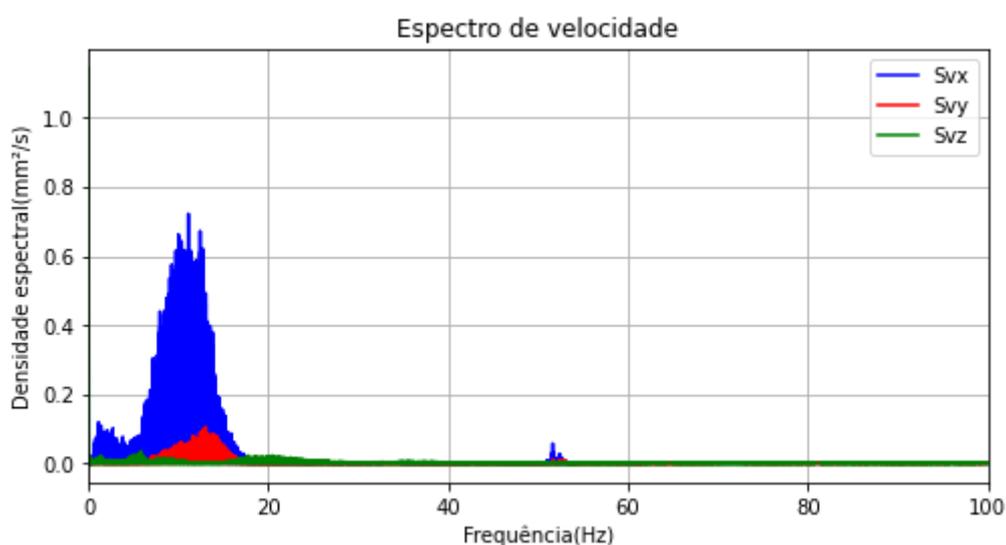
Figura 158 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 KN solto à 8 m de altura medidas à 6,6 m de distância do eixo da fonte: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

Na Figura 159 (Ensaio X) foi analisado o efeito da velocidade da onda em relação a uma sequência de 7 golpes no solo em uma altura fixa de 8 m e distância de 4,6 m em relação a origem do impacto. Percebe-se na Figura 159a que independente do aumento da profundidade da cratera pós-compactação e da densificação do solo abaixo do ponto de impacto, o *PPV* de cada golpe apresentou leves oscilações na sua magnitude (entre 60 mm/s e 80 mm/s). Por outro lado, como as ondas foram captadas radialmente, o amolgamento do solo do entorno da cratera influenciou de maneira pouco significativa nas respostas da velocidades de propagação, uma

vez as *PPVs* se manifestaram de forma semelhantes. Este é um forte indicativo de que o melhoramento acontece mais no fundo da cratera do que necessariamente lateral.



(a)



(b)

Figura 159 – Respostas de vibrações do martelo de compactação de 55 kN solto à 8 m de altura medidas à 4,6 m de distância do eixo da fonte com 7 golpes seguidos: a) Velocidade das ondas vs Tempo; b) Densidade espectral vs Frequência. (Fonte: Própria, 2020)

Outro aspecto que pode ser observado (ver a Figura 159b) é de que as frequências de maior energia, em geral, alocaram-se na faixa de 10 e 20 Hz, sendo as frequências radiais mais proeminentes (11,08 Hz). Este comportamento é curioso, uma vez que ainda que houvesse

suscessivos golpes, as ondas se concentraram em uma faixa de vibrações bem definida e provavelmente justificados pelo comportamento homogêneo das ondas vibratórias.

A Figura 160 ilustra o gráfico normalizado do *PPV* no solo laterítico estudado e como pode ser visualizado, baseado nos resultados experimentais com 1º golpe, houve uma relação ótima ($R^2 = 0,89$) dos dados obtidos em função da variação dos parâmetros H e D_w . Desta forma, foi então proposta a equação empírica de *PPV* aos moldes das equações expressas por Attewell e Farmer (1973) e Wiss (1981).

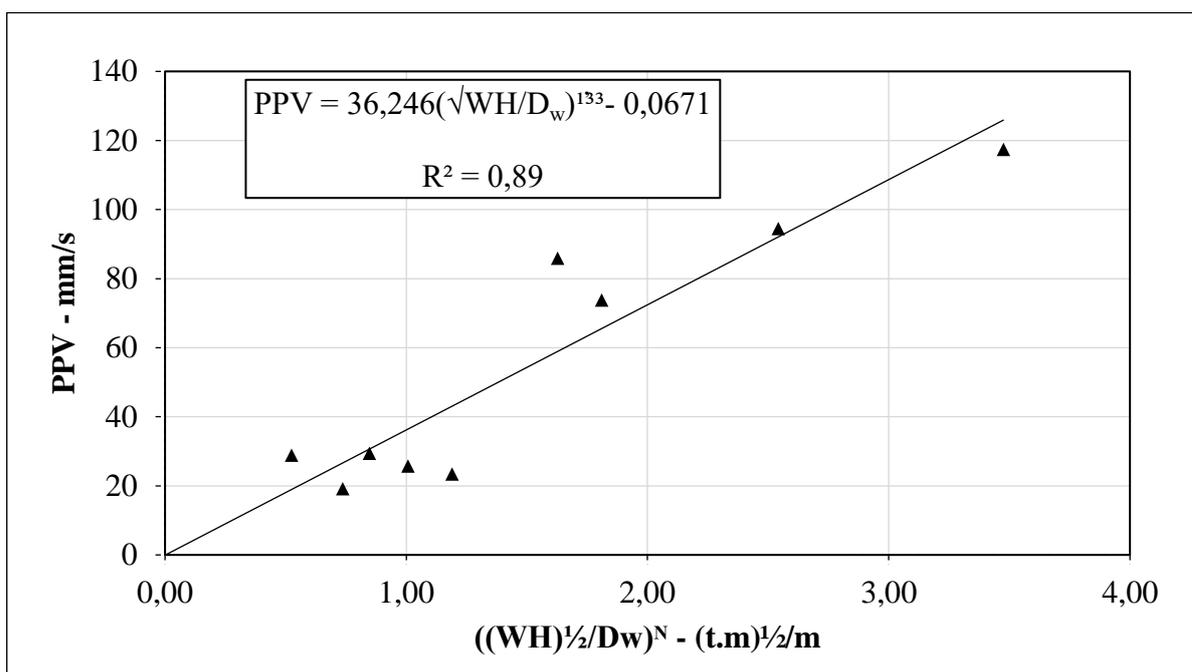


Figura 160 – Gráfico normalizado de *PPVs* obtidos no campo experimental (Fonte: Própria, 2021)

Tendo em vista que do ponto de vista prático e teórico o valor de *PPV* é nulo quando H tem valor nulo independente da distância D_w e sabendo que o valor do coeficiente linear se aproxima de zero (-0,0671), o mesmo foi desconsiderado da equação empírica desenvolvida no estudo. Além disso, pra efeito praticidade, o valor do coeficiente angular foi aproximado para 2 casas decimais, conforme equação (66):

$$PPV \left(\frac{mm}{s} \right) = 36,25 \left(\frac{\sqrt{WH}}{D_w} \right)^{1,33} \quad (66)$$

A seguir (ver a Figura 161) pode ser visualizado um estudo comparativo entre a curva propostas e as demais obtidas por outros trabalhos de outros autores, como Mayne *et al.*(1984),

Mayne (1985), Dowding (2000) e Rollins e Kim (2010). Percebe-se que a curva proposta pelo estudo possui um comportamento intermediário comparado aos trabalhos de Dowding (2000) e Rollins e Kim (2010), ainda que não houvesse variação da massa do martelo de compactação.

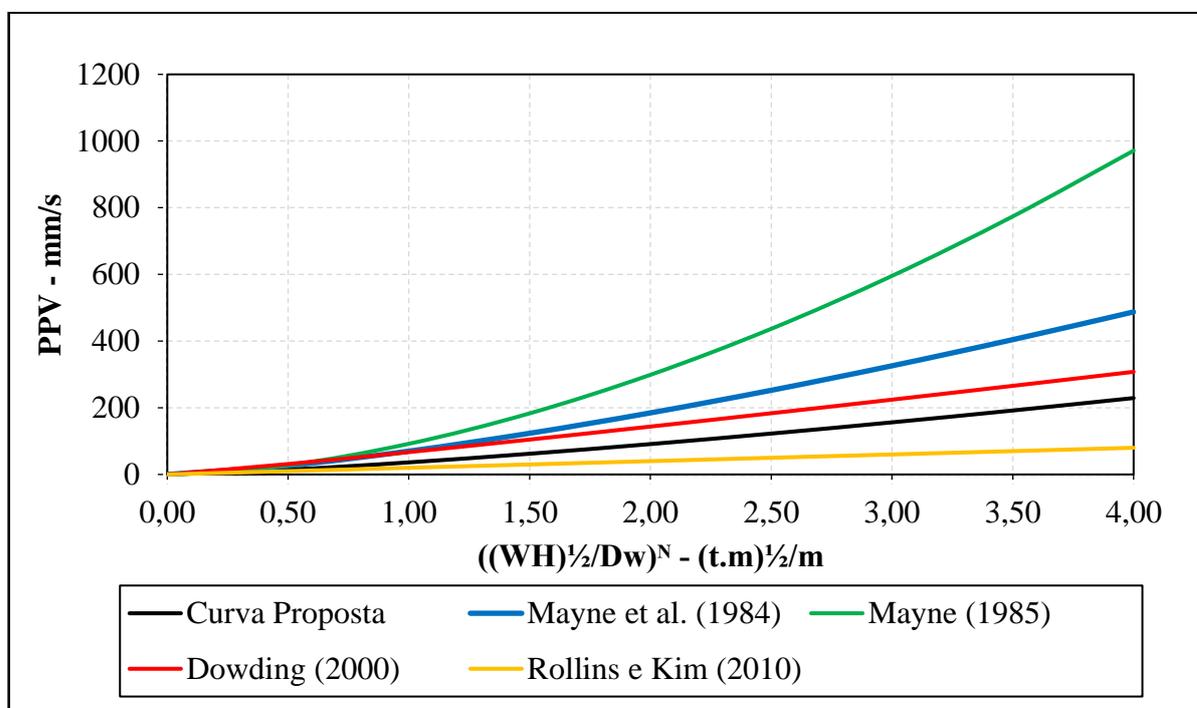


Figura 161 – Estudo comparativo entre curvas normalizadas de *PPV* obtidas por diversos trabalhos e a proposta. (Fonte: Própria, 2021)

6.5 ENSAIO DE PLACA SOBRE SOLO NATURAL E COLUNAS

Neste tópico serão apresentados os resultados de placa obtidos no campo experimental do CETEC, assim como os modos de falha manifestados durante e após o ensaio.

6.5.1 Resultados dos ensaios de placa nas colunas e no solo natural

Uma vez realizados os ensaios de placa estabelecidos na Tabela 14 e na cota superficial do solo laterítico foram observados comportamentos interessantes a partir das respostas ilustradas na Figura 162 e Figura 163. Em estudos realizados em areias, Vesic (1963) distinguiu as rupturas nos solos de três formas distintas: generalizada, localizada ou por puncionamento. Em casos de materiais cimentícios pode ocorrer um puncionamento de forma progressiva, cisalhando a camada no sentido do carregamento (Thomé, 1999).

Inicialmente, ao se comparar as respostas dos ensaios de placa realizados na superfície (Horizonte A) com as obtidas por Dalla Rosa (2004), ou seja, no Horizonte B se constatou uma variação significativa de resistência ao cisalhamento do solo (aproximadamente o dobro da carga considerando recalques de 25mm) e módulo elástico maior, uma vez que nas camadas mais superficiais do solo laterítico de Passo Fundo há presença de uma leve cimentação proveniente de processos de laterização e elevada sucção total em estado não saturado.

Esses solos são caracterizados por apresentarem alguma rigidez inicial, contudo dependendo do nível de carregamento aplicado, entram em colapso e manifestam deformações elevadas. A elevada rigidez superficial foi apresentada por Faro (2014) através de ensaios CPT e DMT (ver a Figura 104), onde fica nítida a presença dos estratos mais resistentes (4 a 6 MPa) até aproximadamente 0,5 m.

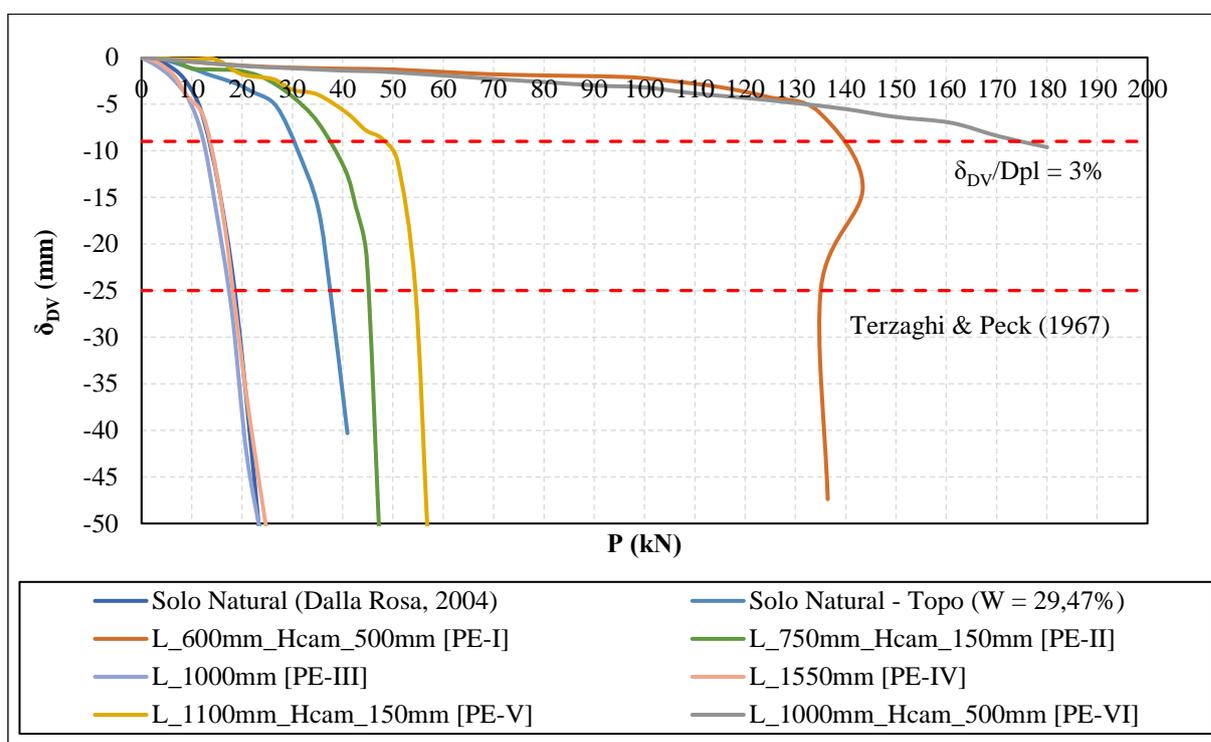


Figura 162 – Resultados dos ensaios de placa realizados, em termos de P (kN) vs δ_{DV} (mm) com o dado de Dalla Rosa (2004). (Fonte: Própria, 2021)

Quanto as colunas granulares do PE-III e PE-IV, independente da sua profundidade, o comportamento P vs δ_{DV} , assim como σ_{pl} vs δ_{DV}/D_{pl} (ver a Figura 162 e a Figura 163) foram semelhantes, sendo um indicativo de que a variável L salvaguarda as condições de compactação e extensão do solo laterítico, não é significativa no estudo.

Também, nota-se uma semelhança entre a curva do solo natural obtida por Dalla Rosa (2004) e as curvas das colunas granulares, salientando que para pequenas deformações, o solo natural apresentou uma fase elástica superior ao solo melhorado com a coluna. Portanto, a solução de se utilizar unicamente o preenchimento com a areia de Osório/RS não demonstrou ser eficiente como técnica de melhoramento. Isso se deve ao fato de que o material granular, ainda que densificado, não atingiu um nível de compactidade característico de um material compacto, como se esperava. Quanto as formas das curvas P vs δ_{DV} , o comportamento de ruptura nítida para deslocamentos grandes (superiores a 3%) coaduna com o comportamento dúctil das areias em ensaios triaxiais CID nas tensões confinantes estudadas (ver item 6.9). Mesmo assim, ao analisar as amostras indeformadas extraídas por meio de um cilindro cortante, foi constatado que o material encontrava-se em estado fofo a medianamente compacto na PE-III e na PE-IV.

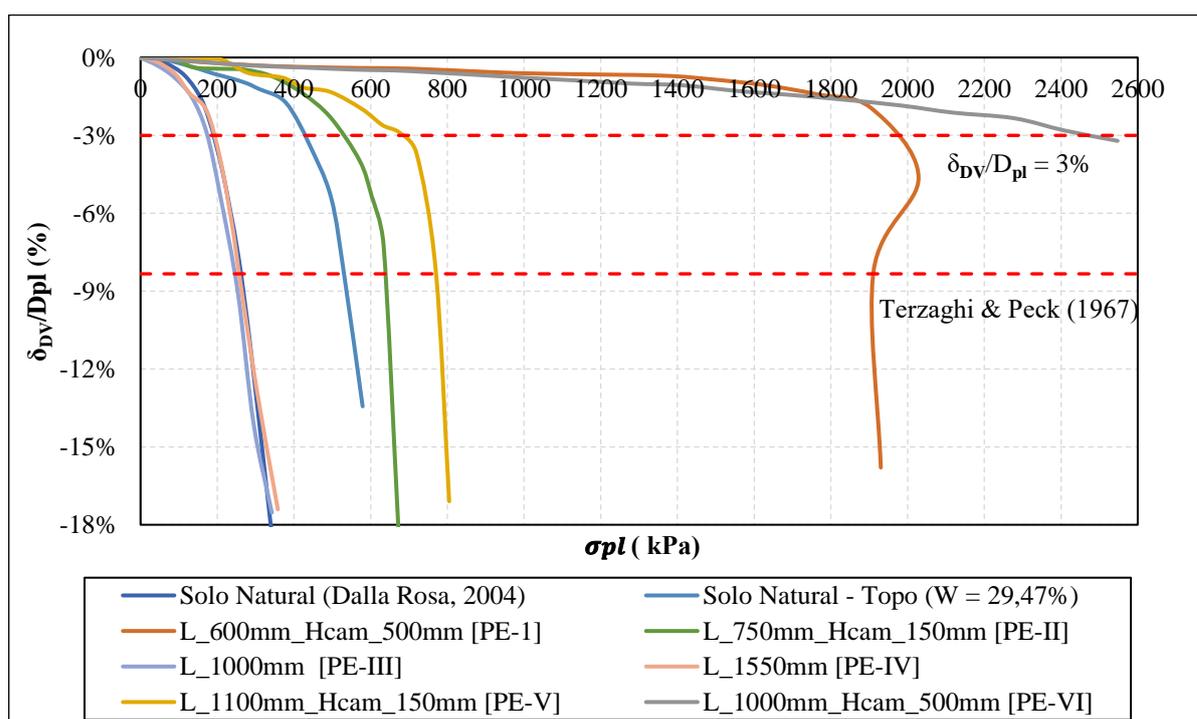


Figura 163 – Resultados dos ensaios de placa realizados, em termos de σ_{pl} (kN) vs δ_{DV}/D_{pl} (%) com o dado de Dalla Rosa (2004). (Fonte: Própria, 2021)

Em relação aos PE-II e PE-V, colunas com H_{cam} igual a 150 mm, nota-se um comportamento bastante similar, com uma diferença aproximada de 8 kN na capacidade carga última, o que corrobora a explicação de a variação da profundidade da coluna não possibilitou mudanças significativas na resposta da curva P vs δ_{DV} . Provavelmente, as variações entre as curvas se devam a variabilidades ocorridas no estudo, como a resistência ao cisalhamento do

material da camada melhorada (presença de sucção na camada, mistura, etc.). Contudo, a capacidade de carga última e a rigidez destas colunas com camada foram superiores às das colunas sem camada e aproximadamente 100%, indicando que a camada flexível absorveu e transferiu a carga aplicada pela placa para a seção transversal da coluna até que a placa atingisse o estado limite último e rompesse.

Nas camadas mais espessas, PE-I e PE-VI, se nota que as respostas relativas à rigidez e capacidade de carga última foram muito superiores às do solo natural, sendo constatado um aumento de 9 a 12 vezes. De fato, o aumento da espessura da camada melhorada demonstrou ser o parâmetro mais significativo no estudo comparado a espessura da coluna granular nas condições de compactação a qual se encontrava. Além disso, o PE-I apresentou uma capacidade carga última menor que o PE-VI, sendo que a coluna granular de PE-I aproximadamente metade da altura da coluna granular do PE-VI. Esse aumento da resistência ao cisalhamento, pode ter ocorrido, em hipótese, devido a elevação da tensão efetiva do material granular devido ao confinamento propiciado pela camada melhorada.

Porém se ressalta que o PE-I apresentou valores de resistência de compressão não confinada inferiores ao do PE-VI, assim como valores de sucção menores, provavelmente devido a presença de um estrato de solo melhorado mal misturado aproximadamente no meio da camada. Mesmo assim, percebe-se que o comportamento P vs δ_{DV} para carregamentos até 125 kN foram muitos próximos. A Figura 164 informa de maneira resumida os valores do carregamento do ponto de estudo considerando o deslocamento de 9,0 mm ($\delta_{DV}/D_{pl} = 3\%$).

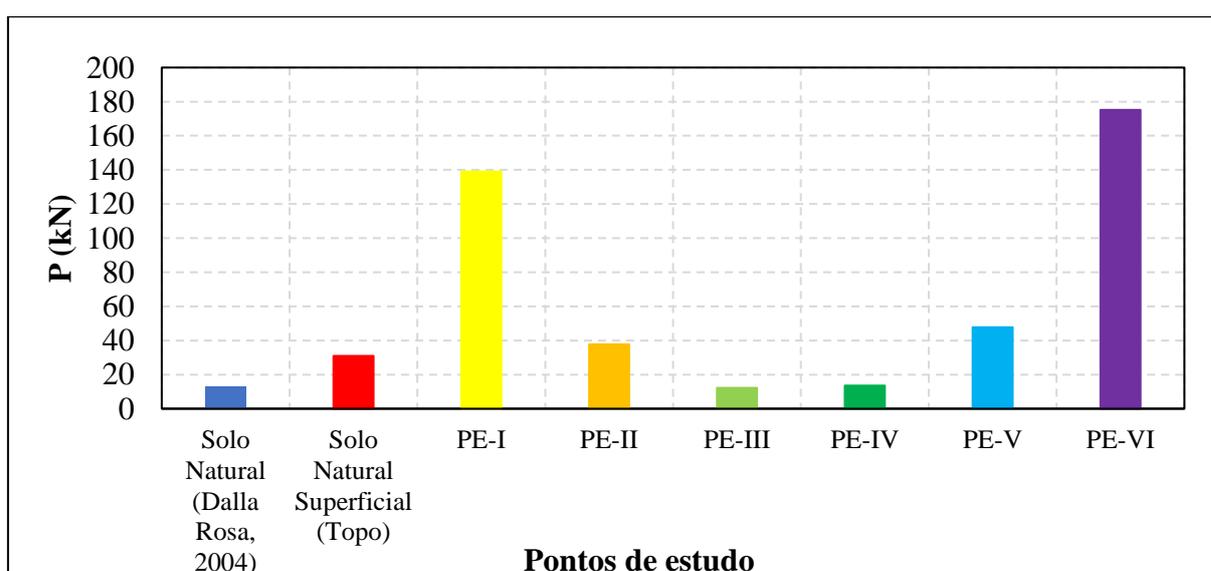


Figura 164 – Resumo dos valores das cargas aplicadas nos ensaios de placa considerando $\delta_{DV}/D_{pl} = 3\%$ com adição do ensaio de Dalla Rosa (2004). (Fonte: Própria, 2021)

Ao comparar o presente estudo com os resultados obtidos por Giese (2019), verificou-se que o solo natural compactado apresentou um comportamento menos rígido que o solo granular compactado, contudo para grandes deslocamentos (deslocamento superior a 25mm) houve um leve aumento de resistência do material provavelmente oriundo da compactação e/ou adensamento do solo, como pode ser visto na Figura 165.

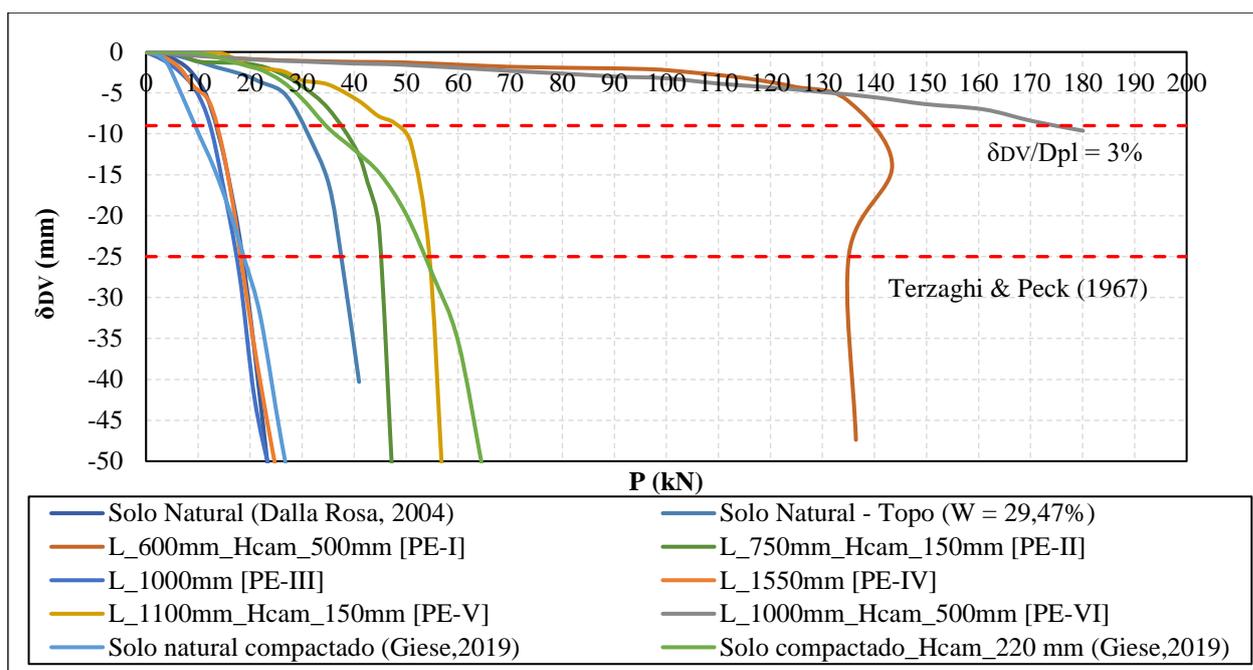


Figura 165 – Estudo comparativo entre os ensaios de placa da pesquisa conjuntamente com os dados de Dalla Rosa (2004) e Giese (2019). (Fonte: Própria, 2021)

Ao se introduzir a camada melhorada no solo compactado, a curva apresentou um comportamento equivalente a elastoplástico com endurecimento (“*strain hardening*”), cuja resistência aumenta conforme há elevação da deformação axial. Entretanto, ao se avaliar o comportamento da H_{cam} igual a 150 mm, referentes aos PE-II e PE-V, ocorreu de forma dúctil. Desta forma, pode se inferir que o material de base não apenas afeta a capacidade resistente, como também o comportamento elastoplástico do sistema.

6.5.2 Modos de falha das colunas de reforço e do solo natural

Após a realização do ensaio de placa no topo do solo natural foi obtida uma resposta mais resistente comparada ao obtido por Dalla Rosa (2004) e referenciado por outros autores como Giese (2019) e Rossi (2019). No que tange a forma da curva P vs δ_{DV} foi percebido um comportamento elastoelástico semelhante, cujo modo de ruptura se deu por um nítido

puncionamento do solo (afundamento da placa sem presença de elevação lateral ao entorno da placa), conforme ilustrado na Figura 166.

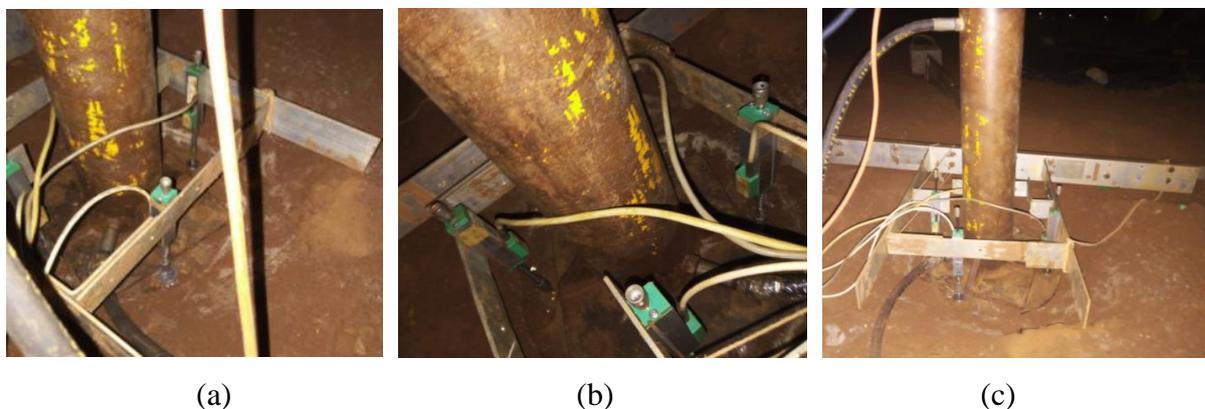


Figura 166 – Ensaio de placa realizado no topo do solo natural do campo experimental de Passo Fundo/RS: a) Vista Lateral; b) Vista superior; c) Vista Frontal. (Fonte: Própria, 2021)

Em relação ao PE-I (ver a Figura 167) o sistema camada melhorada/coluna de solo apresentou uma carga máxima de 143 kN com carga residual de 137 kN e foi constatado, assim como no solo natural, a ruptura por puncionamento (ruptura frágil) da camada caracterizado por um afundamento de placa e trincas paralelas que se iniciam na borda da placa e se estendem até um determinado raio de influência em relação ao centro da camada, como pode ser visto na Figura 167a. A pressão de contato da placa/camada possibilitou a formação de zonas plásticas na região de borda placa em função do acréscimo de tensões até atingir o seu limite de ruptura.

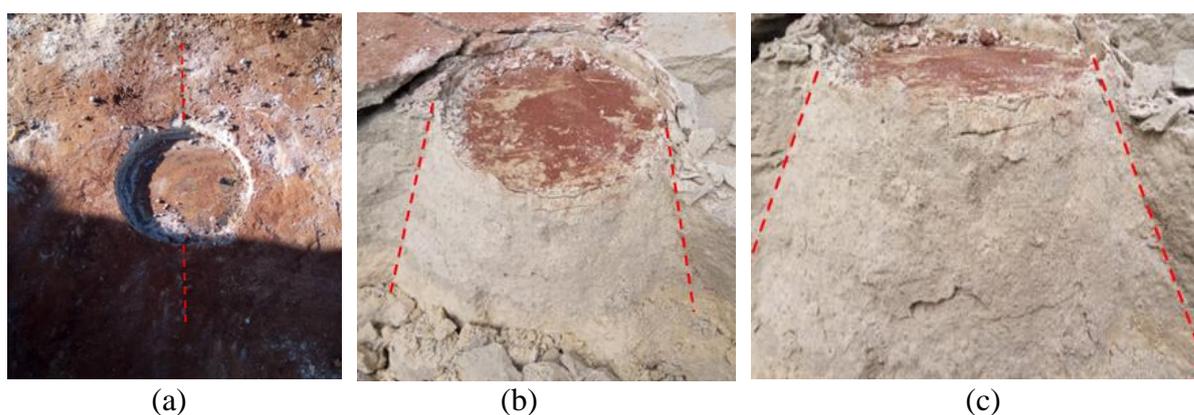


Figura 167 – Ruptura da camada melhorada do PE-I ($H_{cam} = 500$ mm): a) Vista superior do afundamento da placa; b) formação de um tronco de cone na zona carregada; c) Vista em corte da camada melhorada rompida. (Fonte: Própria, 2021)

Na Figura 167b percebe-se uma leve heterogeneidade aproximadamente na terceira camada, o que pode ter afetado a resistência final de todo o sistema. Esta ocorrência se deve a

complexidade de realização de mistura de grandes quantidades de materiais no interior da betoneira, uma vez que efeito cascata, gerado pela rotação da betoneira durante a mistura, aliado ao baixo teor de umidade existente na mistura foi insuficiente para possibilitar a homogeneização adequada. Na Figura 167c percebe-se a formação de um tronco de cone densificado na região do afundamento, que é típico de mecanismos de ruptura progressiva de camadas melhoradas [e.g, Thomé, 1999; Rossi, 2019].

O PE-VI apresentou um comportamento rígido sem manifestação de ruptura até a carga de 180 kN com deslocamentos inferiores a 10 mm devido a questões de segurança. Entretanto, pode ser observado durante o processo de exumação da camada para coleta de corpos de prova que se formaram tendências de configuração de ruptura caracterizadas pelas trincas geradas na durante o processo, como pode ser visto na Figura 168a.

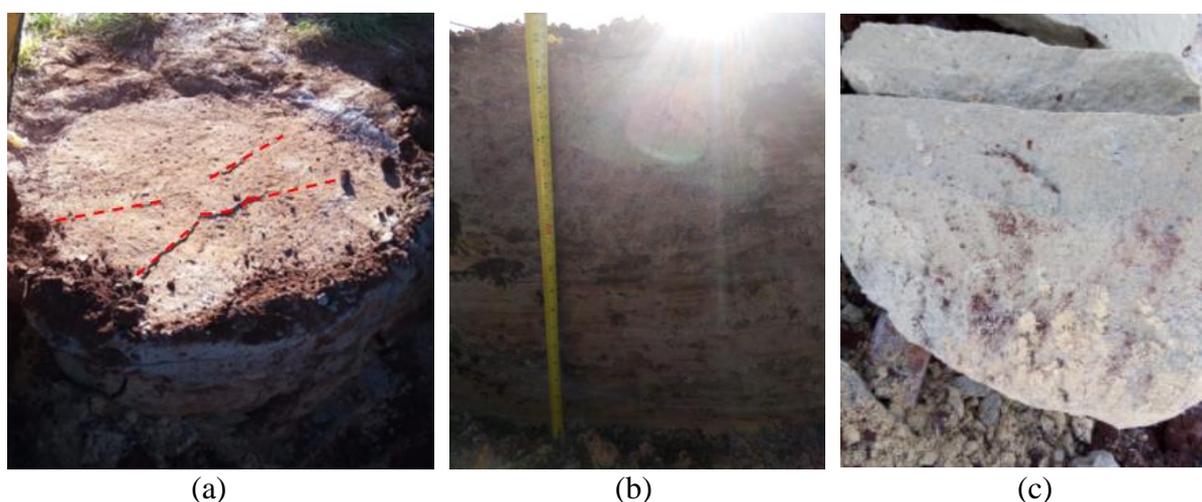


Figura 168 – Ruptura da camada melhorada do PE-VI: a) Camada melhorada plastificada; b) vista lateral da camada; c) aspecto do material internamente. (Fonte: Própria, 2021)

Com essa manifestação evidente infere-se que a camada melhorada estava em fase de plastificação para o nível de carregamento. A Figura 168b demonstra com perfeição que a camada apresentou exatamente 500 mm, com material aparentemente homogêneo (Figura 168c).

Quanto ao PE-V, ainda que mais flexível, nota-se uma certa similaridade com o PE-I devido à formação de trincas radiais que se iniciam a partir do puncionamento da placa no centro (ver a Figura 169a) e se proliferam até as bordas da camada (Figura 169b), conforme há acréscimo de tensão na placa associado ao aumento do deslocamento vertical e também foram formadas zonas de plastificação pelo contato placa/camada abaixo das bordas da placa até a falha (LOPES e VELLOSO, 2012). Por fim, nota-se, mais uma vez, a típica formação do tronco de cone na região plastificada abaixo da placa oriundo do mecanismo de ruptura progressiva.

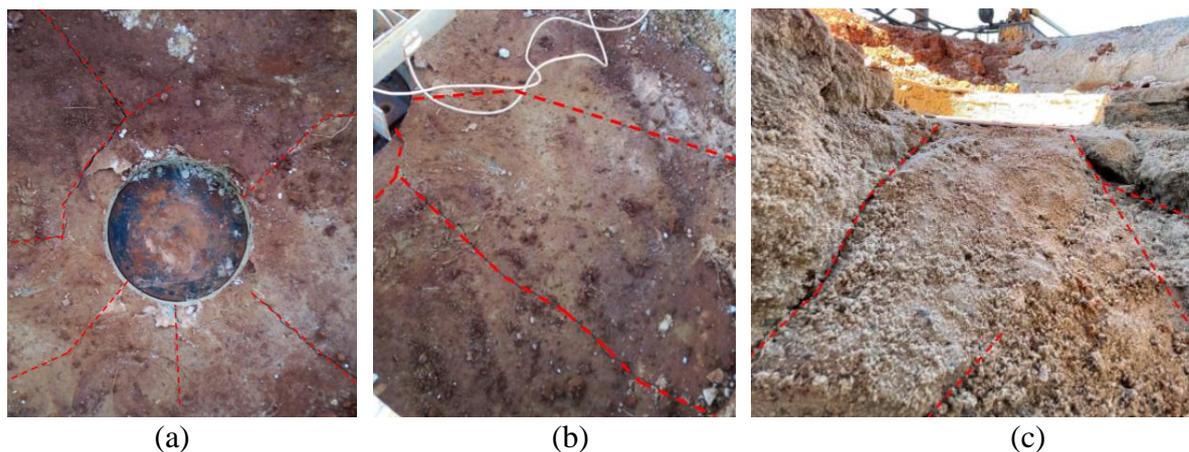


Figura 169 – Ruptura da camada melhorada do PE-V: a) diagramação da ruptura; b) Proliferação das fissuras até o bordo da placa; c) Formação do cone de densificação na ruptura. (Fonte: Própria, 2021)

O PE-II apresentou uma configuração de trincas na ruptura similar ao do PE-V, como pode ser visto na Figura 170. Na mesma figura é possível observar a perfeita formação de tronco de cone na região abaixo da placa. Além disso, o fato de o PE-II apresentar uma profundidade superior ao do PE-V pode ter afetado levemente o comportamento resistente do sistema (camada melhorada/ coluna granular) e a rigidez.

Nas colunas granulares, como no caso do PE-III e do PE-IV, houve manifestação de um comportamento típico caracterizado pelo afundamento superficial com presença de trincas ao entorno da placa, conforme Figura 171 e Figura 172.

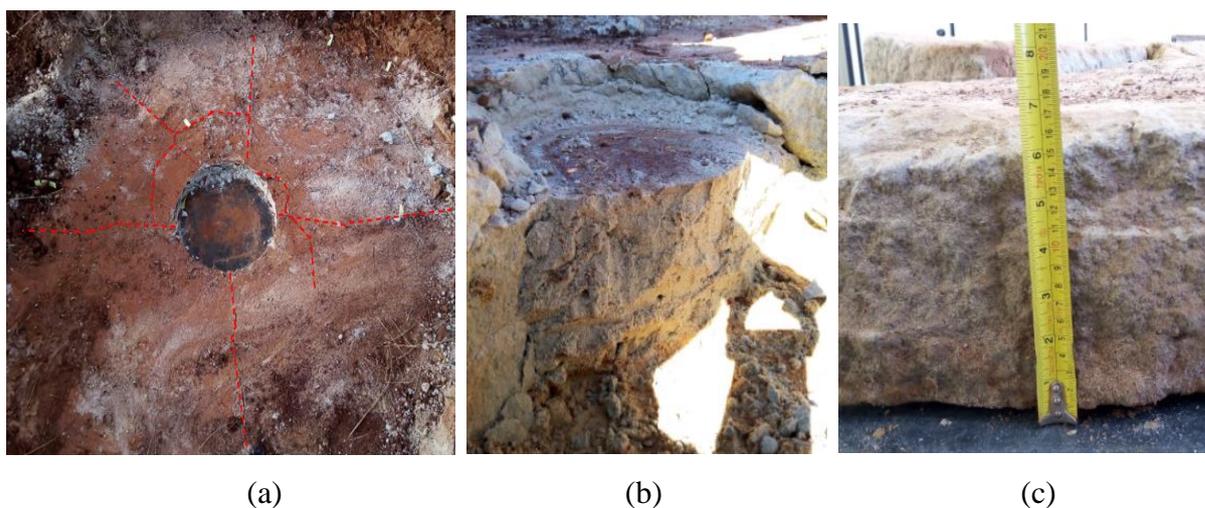


Figura 170 – Ruptura da camada melhorada do PE-II: a) Detalhe do afundamento da placa e diagramação das fissuras e trincas; b) Detalhe da formação do tronco de cone; c) Detalhe da espessura da camada. (Fonte: Própria, 2021)

O uso singular da coluna granular não se mostrou eficiente para melhoria do solo, uma vez que os resultados do ensaio de placa apontaram que a relação da P vs δ_{DV} foi semelhante ao comportamento do solo natural. Devido ao fato da areia ter estado seca e considerando a baixa altura de queda ($H = 3,0$ m) e/ou a reduzida massa do martelo de compactação ($P = 55$ KN) não gerou energia o suficiente para que o material atingisse um valor de densidade relativa característica de material compacto.



Figura 171 – Ruptura do PE-III: a) Detalhe do afundamento da placa na superfície após o ensaio; b) Detalhe da formação da trinca ao entorno da placa após o ensaio. (Fonte: Própria, 2021)

Na Figura 171a pode ser visto o aspecto fofo do material granular na superfície dando indicativos da baixa compactação na coluna. Desta forma, ao fim do ensaio de placa, foram retiradas amostras do solo com auxílio de cilindros cortantes e estudados os índices de vazios do material e com isso foram obtidos valores de 0,790 ($D_r = 44,08\%$) no PE-III e 0,745 ($D_r = 61,89\%$) no PE-IV referentes a um solo medianamente compacto. Ao mesmo tempo, na Figura 172a demonstra trincas em formato de “teia de aranha” na superfície geradas pelo descalçamento após o afundamento da placa. O nível de compactação do material arenoso abaixo da superfície corroborou a progressão da trinca presente na Figura 172b, dando indícios de uma provável trinca devido a uma ruptura generalizada.

Observa-se que o uso da camada melhorada sobre a coluna permitiu que os esforços se distribuíssem ao longo da sua área efetiva e assim uniformizar as tensões interpartículas e ao mesmo tempo permitir o confinamento da areia de modo aproveitar as características dilatantes.

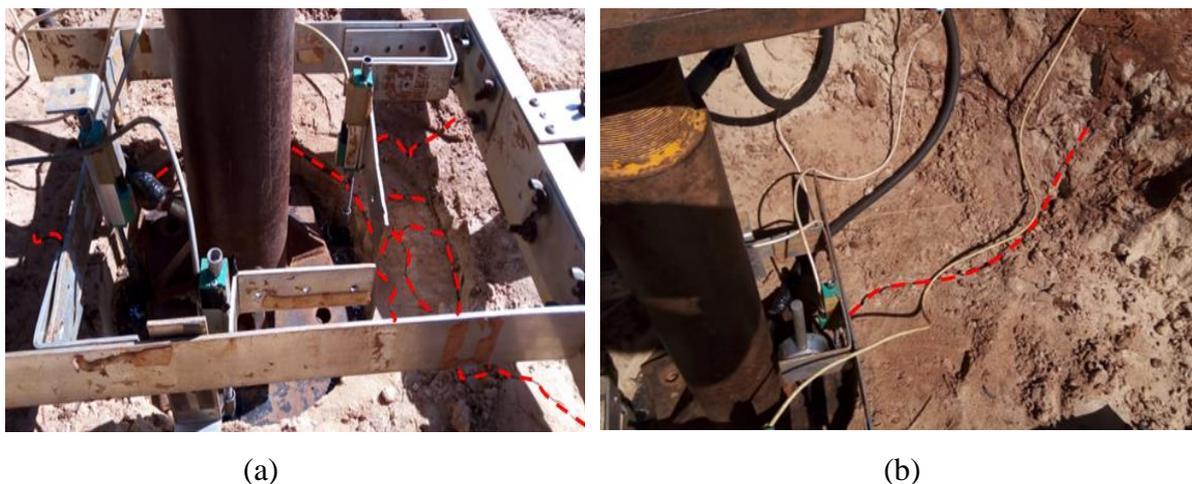


Figura 172 – Ruptura do solo do PE-IV (sem Camada): a) Detalhe do afundamento da placa na superfície e formação das trincas superficiais após o ensaio; b) Detalhe do prolongamento da trinca do centro a periferia da coluna. (Fonte: Própria, 2021)

6.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Após a realização dos ensaios de placa sobre a camada melhorada, foram esculpido corpos de prova com dimensões de 50 mm \times 100 mm, submetidos ao processo de saturação por um período mínimo de 24h e posteriormente foram rompidos em prensa de compressão automatizada com uma velocidade de carregamento de 1,27 mm/min. Feito isto, os resultados das rupturas foram organizados e interpretados na Tabela 28.

De um modo geral, os valores médios das resistências à compressão não confinada da camada variaram entre 0,52 a 0,92 MPa. Nos estudos de Cruz (2008), a mistura com as condições de compactação estabelecidas, em condições controladas, apresentou valores entre 0,9 a 1,0 MPa, contudo, no decorrer do processo da mistura do solo melhorado com cimento, a mistura não ficou completamente homogênea em função da grande quantidade de material introduzido na betoneira associada a característica seca da mistura, considerando também que a mistura seca adere facilmente nas paredes internas da betoneira, dificultando assim a homogeneização.

Cabe sinalizar, que não se sabe exatamente se os pontos de coletas estavam afetados pelo processo de amostragem ou pelas trincas que se proliferaram durante o ensaio de placa, e, portanto, não há garantias de que não houvessem fissuras internas que influenciassem no comportamento resistente global dos corpos de prova.

Quanto ao material, a areia foi seca ao ar e em todas as misturas o teor de umidade natural não extrapolou o valor de 3% e o cimento encontrava-se homogêneo sem presença de grumos. Entretanto, o efeito cascata gerado pela rotação da betoneira não desenvolveu energia suficiente para realização de uma mistura adequada, prejudicando a mistural final. Este comportamento também foi presenciado nos trabalhos de Ruver (2011) e Faro (2014).

Tabela 28 – Resultados dos ensaios de compressão não confinada dos testemunhos extrudados das camadas melhoradas. (Fonte: Própria, 2021)

H_{cam} = 150 mm					
ID	CP	q_u (MPa)	q_{u médio} (MPa)	Δ (MPa)	CV (%)
PE-II	CP 1	0,509	0,614	0,033	5,36%
	CP 2	0,579			
	CP 3	0,598			
	CP 4	0,655			
	CP 5	0,625			
PE-V	CP 1	0,949	0,868	0,114	13,19%
	CP 2	1,028			
	CP 3	0,786			
	CP 4	0,804			
	CP 5	0,772			
H_{cam} = 500 mm					
ID	CP	q_u (MPa)	q_{u médio} (MPa)	Δ (MPa)	CV (%)
PE-I	CP 1	0,575	0,525	0,062	11,76%
	CP 2	0,458			
	CP 3	0,591			
	CP 4	0,464			
	CP 5	0,540			
PE-VI	CP 1	0,823	0,917	0,091	9,97%
	CP 2	0,605			
	CP 3	0,718			
	CP 4	1,006			
	CP 5	0,922			

Ainda assim, como pode ser visto, as resistências nas camadas melhoradas apresentaram resultados homogêneos pois os valores dos coeficientes de variação foram inferiores a 15%. Ou seja, em termos comparativos, ainda que os valores médios das resistências à compressão não confinada ($q_{u\ médio}$) variassem entre camadas, especificamente em cada camada o conjunto amostral apresentou um comportamento homogêneo, indicando que estas resistências médias são representativas nas respectivas camadas.

6.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SUCCÃO PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO

Imediatamente após a realização dos ensaios de placa foram extraídas amostras da camada melhorada e medidas as sucções mátricas com auxílio do papel filtro *Whatman N° 42* (um na base para proteção contra colmatção e um acima para absorção). As amostras foram embaladas com papel filme e condicionadas em caixa plástica vedada e armazenada em ambiente com temperatura controlada. A Tabela 29 informa todos os resultados de sucção mátrica das quatro camadas melhoradas do estudo de campo interpretadas pelos modelos de Fredlund e Xing (1994), Chandler *et al.* (1992) e Leong *et al.* (2002).

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de sucção mátrica obtidos pelo método do papel filtro. (Fonte: Própria, 2021)

Coluna	Item	Modelos		
		Fredland e Xing (1994)	Chandler <i>et al.</i> (1992)	Leong <i>et al.</i> (2002)
		Sm (kPa)	Sm (kPa)	Sm (kPa)
PE - I (H _{cam} = 500 mm)	1	547,45	652,96	567,33
	2	336,85	413,58	346,14
	3	802,60	898,18	801,07
PE - VI (H _{cam} = 500 mm)	1	8136,22	3557,72	3552,18
	2	4913,47	2809,86	2751,73
	3	5678,95	3015,61	2970,38
	4	7983,30	3528,03	3520,13
PE - II (H _{cam} = 150 mm)	1	691,78	796,71	703,62
	2	259,02	314,34	257,23
	3	646,97	753,58	662,50
	4	286,51	350,11	289,05
	5	834,07	925,78	827,74
PE - V (H _{cam} = 150 mm)	1	431,22	525,77	448,78
	2	461,369	559,85	480,34
	3	572,36	678,81	591,68
	4	910,69	990,87	890,89

Ao interpretar os ensaios de sucção matricial nota-se que, de um modo geral, devido aos mesmos terem sido realizados em períodos mais ensolarados, o solo melhorado com cimento encontrava-se em estado não saturado com níveis de sucção que variavam entre 257 kPa a 890 kPa nos PE-I, PE-II e PE-V. Quanto a camada do PE-VI foi a que obteve maiores níveis de sucção mátrica (entre 2700 e 8000 kPa, dependendo do método) e coincidente foi a camada melhorada que apresentou maiores valores, tanto na resistência ao cisalhamento quanto na rigidez. Portanto, infere-se que o estado não saturado da camada melhorada pode ter contribuído de forma significativa no desempenho mecânico da camada melhorada durante o teste de placa.

6.8 EXUMAÇÃO DAS COLUNAS GRANULARES

Ao realizar a exumação do PE-III, alguns aspectos puderam ser notados quanto a forma de ruptura e a resposta de compactação do material. Inicialmente, a coluna apresentou uma altura aproximada de 1,0 m e os solos não se misturaram muito no processo de compactação. Quanto à ruptura, percebe-se nitidamente o puncionamento no centro da coluna em função da compactidade fofa do material das colunas. As setas ilustradas na Figura 173 apontam o afundamento do estrato seco superficial que foi comprimido durante o ensaio de placa.

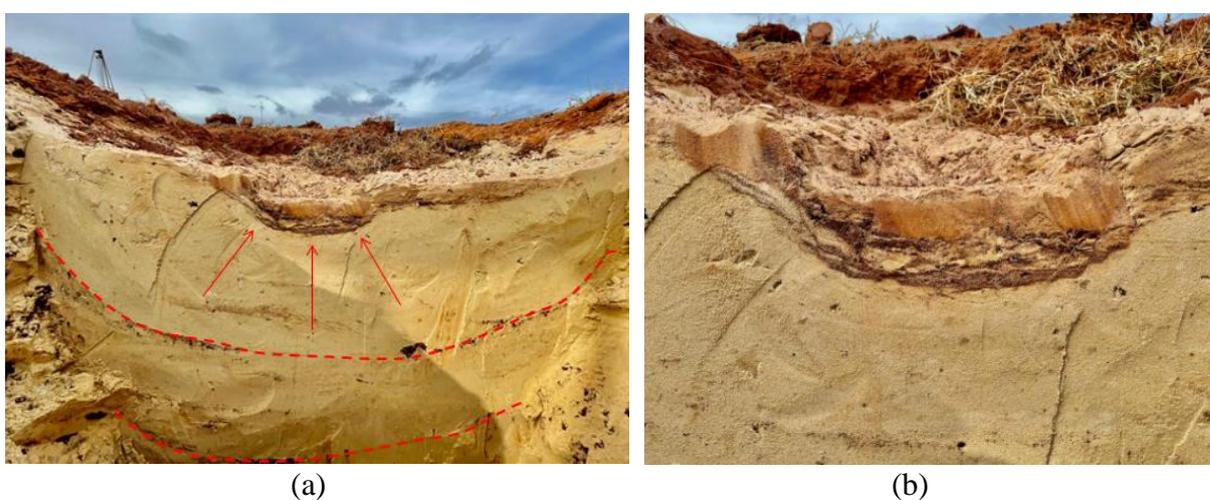


Figura 173 – Exumação do PE - III: a) corte transversal da coluna; b) detalhe do trecho do afundamento da coluna. (Fonte: Própria, 2021)

Nota-se também contornos parabólicos ao longo da profundidade da coluna de areia, que representam o comportamento do material durante a compactação. Os contornos revelam as deformações volumétricas plásticas (ver a Figura 173a) ocorridas na construção das colunas granulares em *layers* (estratos). Este comportamento foi presenciado nos estudos de Oshima e Takada (1997) em estudos de compactação dinâmica em areias a partir de modelos físicos, Póran e Rodriguez (1992) em modelagem numérica da técnica e por Jia *et al.* (2018) em estudos de compactação a partir do MED.

Quanto a coluna do PE-IV, se percebeu que o solo atingiu uma profundidade 1,50 m, porém, similar ao da PE-III, a areia se encontrava com compactidade fofa e não misturada ao solo natural do campo. Foi constatado também que a areia se encontrava úmida ao longo da profundidade e em estado viscoso na base da coluna hipoteticamente engatilhada pela escavação (ver a Figura 174).

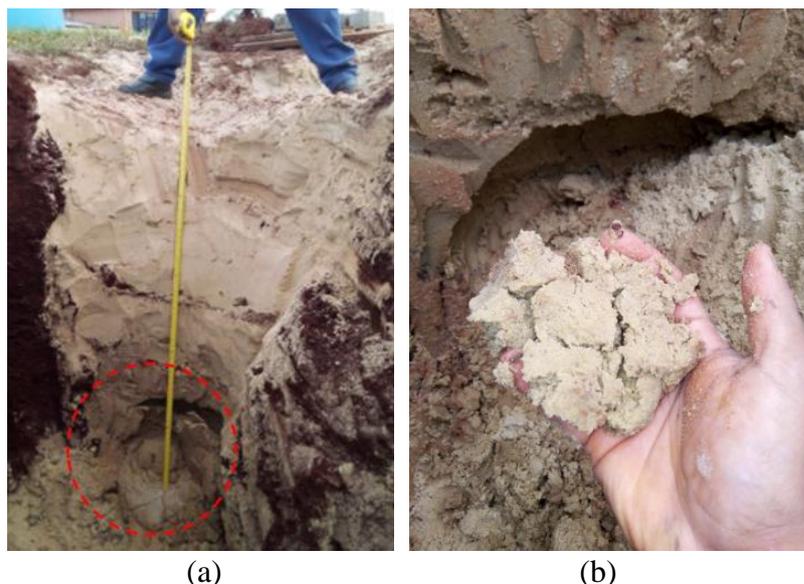


Figura 174 – Exumação do PE-IV: a) corte transversal do PE-IV com detalhe do material sólido-fluido na base; b) detalhe do material de base. (Fonte: Própria, 2021)

Esta mudança de compactidade da areia se deve ao aumento de poropressão do material de base por conta dos períodos chuvosos [i.e, migração das águas pluviais pelos vazios do solo laterítico do entorno e pelo material granular da coluna e armazenamento] associados à mudança brusca de condutividade hidráulica do solo laterítico na base de Passo Fundo/RS após compactação, conforme mencionado por Rizzon (2016). Este comportamento merece grande atenção pois o material granular em estágio liquefeito possibilita grandes reduções de resistência ao cisalhamento da estrutura. Como pode ser visto na foto acima, o material se desprende do corpo da coluna granular e desenvolveu uma cunha nessa região após a escavação do material do entorno.

Além de verificar as condições do material e da formação da coluna granular também foram coletadas amostras da areia e estudados os índices de vazios, assim como a densidade relativa. No PE-III foram extraídas duas amostras em cilindro cortante de quatro profundidades, referentes as cotas -5 cm, -13 cm, -21 cm e -27 cm tomando como base o topo da coluna granular, totalizando assim 8 amostras indeformadas. Assim como PE-III, no PE-IV foram também extraídas duas amostras por profundidade, porém foram retiradas de três profundidades, referentes as cotas -5 cm, -24 cm e -45 cm com base no nível do topo da coluna, totalizando 6 amostras indeformadas. Com isso, os resultados obtidos foram plotados, em termos de e vs $H_s(m)$ (ver a Figura 175) e $D_r(\%)$ vs $H_s(m)$ (ver a Figura 176).

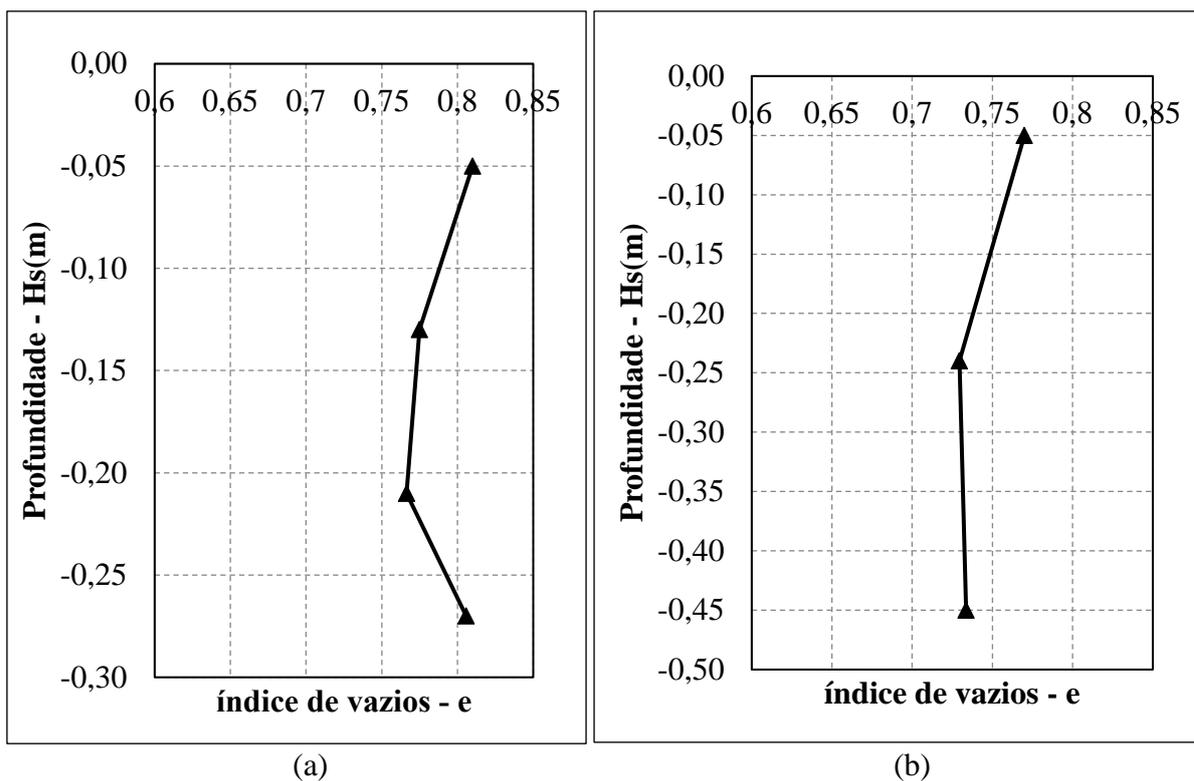


Figura 175 – Avaliação de índice de vazios em função da profundidade da coluna granular : a) PE - III; b) PE -IV . (Fonte: Própria, 2021)

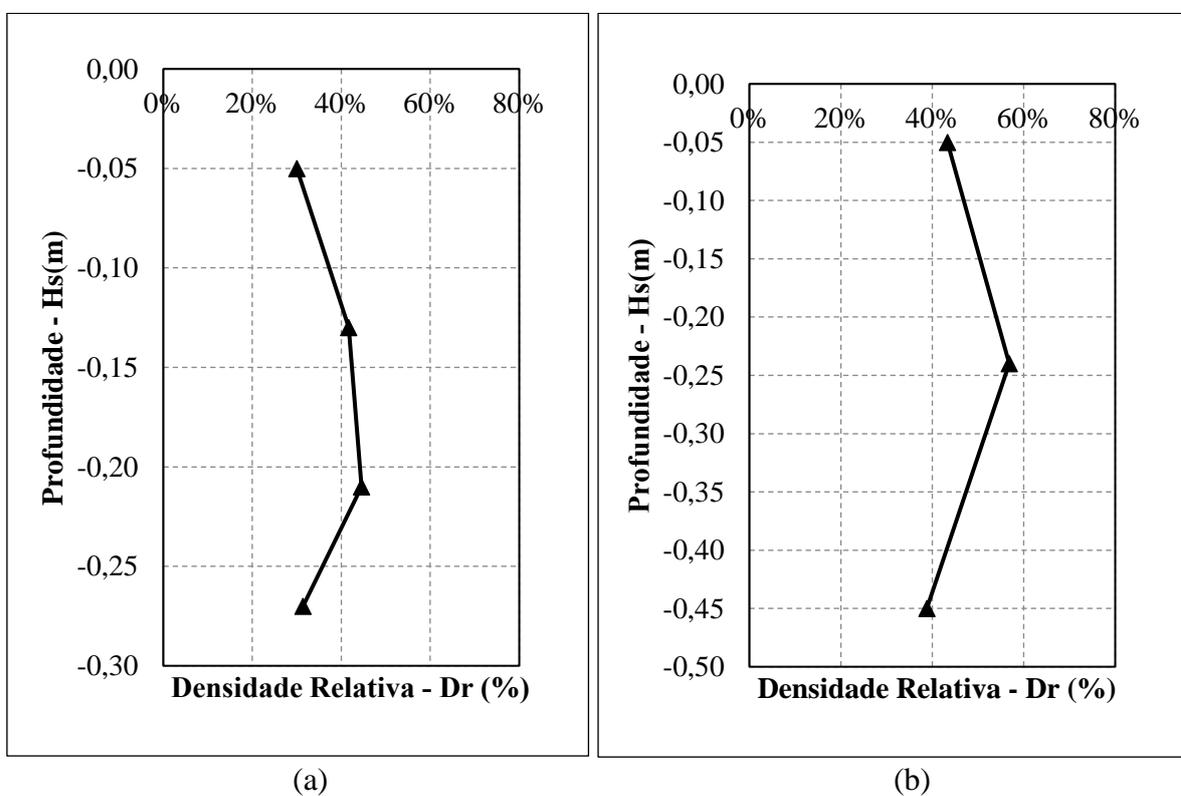


Figura 176 – Avaliação da densidade relativa em função da profundidade da coluna granular: a) PE -III; b) PE -IV. (Fonte: Própria, 2021)

Na Figura 175, tanto no PE-III quanto no PE-IV, os valores dos índices de vazios variaram muito pouco ao longo da profundidade. No PE-III, o valor de e variou entre 0,766 e 0,815 e no PE-IV o valor de e situou-se entre 0,734 e 0,770, sendo classificado como um material de grau de compactação fofo a médio ao longo da profundidade, e portanto pode-se afirmar que coluna foi preenchida e compactada de forma homogênea. Percebe-se também que em ambas as colunas, os índices de vazios das camadas de solo mais superficiais foram maiores. Isto se deve ao amolgamento do material causados pelas chuvas, atividades de campo e transporte superficial de material para a coluna.

Em termos da avaliação de densidade relativa, a Figura 176 revelou que o PE-III apresentou uma densidade relativa entre 30,0% e 44,5%, logo pode ser caracterizada como uma areia fofo a medianamente compacta baseado em Pinto (2006) e Lambe e Withmann (1969). No caso do PE-IV, como a densidade relativa da areia variou entre 38,81% e 56,83%, o material pôde ser classificado como medianamente compacta, conforme a mesma fonte.

6.9 RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DO TIPO CID NA ÁREA DE OSÓRIO/RS

Inicialmente, todos os procedimentos para moldagem dos corpos de prova foram controlados, tais como: da eferição da massa, volume e teor de umidade, para, a partir das propriedades da areia de Osório, serem calculados os índices físicos informados na Tabela 30, assim como as informações obtidas no decorrer do ensaio.

Após a realização dos ensaios do tipo CID na areia de Osório/RS foram encontrados os resultados obtidos na Figura 177, Figura 178 e Figura 179. Para amostras com índices de vazios iguais 0,88 foi constatado que na tensão confinante de 20 kPa e 50 kPa o solo apresentou um comportamento dúctil, porém com a tensão confinante de 80 kPa houve manifestação de uma leve dilatância.

A Figura 178 ilustra o comportamento das trajetórias de tensões do material fofo típico de material com tensão confinante e carregamento axial. A Figura 179 apresenta a envoltória *Mohr-Coulomb*, cujo parâmetro φ' foi igual a 30° , que, de forma consagrada, é considerado o limite mínimo de φ' para areias puras quartzozas brasileiras. A envoltória foi iniciada da origem, ou seja, com intercepto coesivo nulo.

Tabela 30 – Dados das amostras da areia de Osório/RS. (Fonte: Própria, 2021)

Dados	e = 0,88			e = 0,77		
	Valores (σ_3)			Valores (σ_3)		
	20 kPa	50 kPa	80 kPa	20 kPa	50 kPa	80 kPa
ω_o (%)	3,66	3,66	3,95	4,40	4,10	4,21
ω_f (%)	21,09	21,53	21,97	20,66	19,69	20,79
e_o	0,875	0,879	0,884	0,77	0,77	0,77
γ_d (kN/m ³)	13,71	13,68	13,63	14,51	14,55	14,56
γ (kN/m ³)	14,21	14,18	14,17	15,15	15,15	15,15
S (%)	10,96	19,91	11,68	14,97	14,05	14,36
H_o (cm)	10,30	10,27	10,27	10,00	10,00	10,00
A (cm ²)	19,67	19,67	19,67	19,67	19,67	19,67
H_f (cm)	10,04	10,28	10,27	10,19	10,03	9,77

Para avaliar a consistência dos dados obtidos foi feito um teste de caráter prático de deposição de material. Inicialmente foi preenchido um cilindro padrão de ensaio CBR (sem o fundo) com areia de Osório/RS com teor de umidade nulo. Após seu preenchimento por gravidade (sem compactação) e nivelado (arrasamento do topo), o material foi liberado através do levamento da forma no sentido vertical, similarmente ao *Slump test*. Por fim, foi medido ângulo de deposição do material com auxílio do aplicativo *Clinometer*®. O princípio do ensaio se fundamenta na ideia de que o ângulo de repouso do material é aproximadamente igual ao ângulo de atrito do material no mesmo estado.

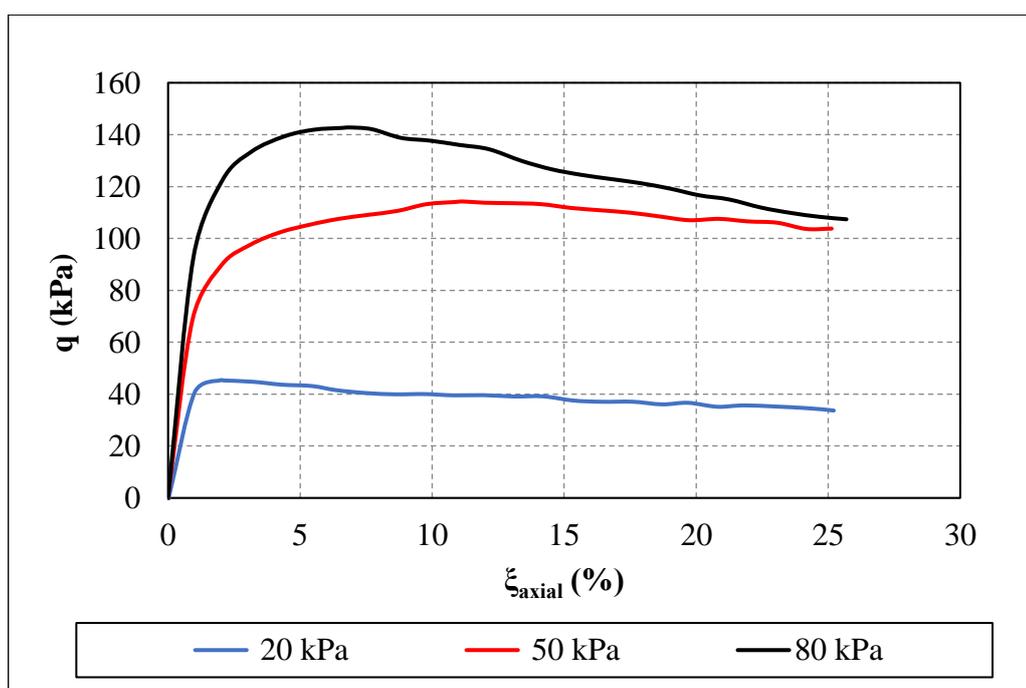


Figura 177 – Relação entre q vs ξ_{axial} do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,88$. (Fonte: Própria, 2021)

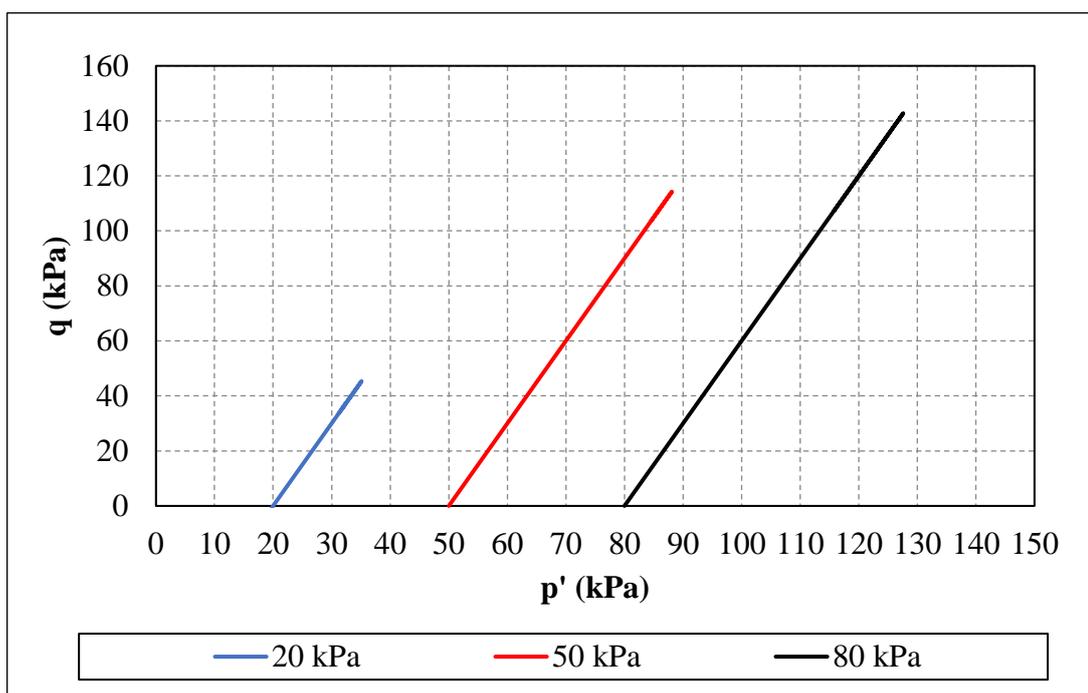


Figura 178 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,88$.
(Fonte: Própria, 2021)

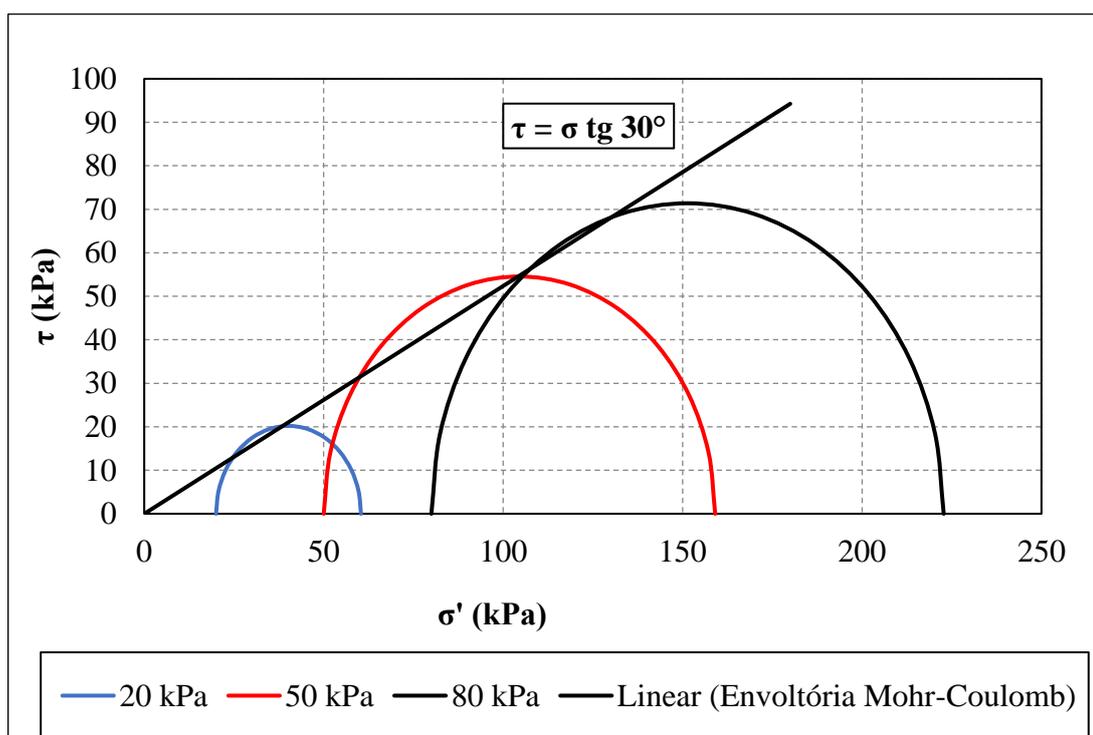


Figura 179 – Envoltória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,88$. (Fonte: Própria, 2021)

A Figura 180 ilustra o processo realizado no ensaio. A ideia do ensaio é de que se o material encontra-se no limite do estado fofo, naturalmente, o mesmo encontra-se aproximadamente igual ao seu ângulo de deposição natural.

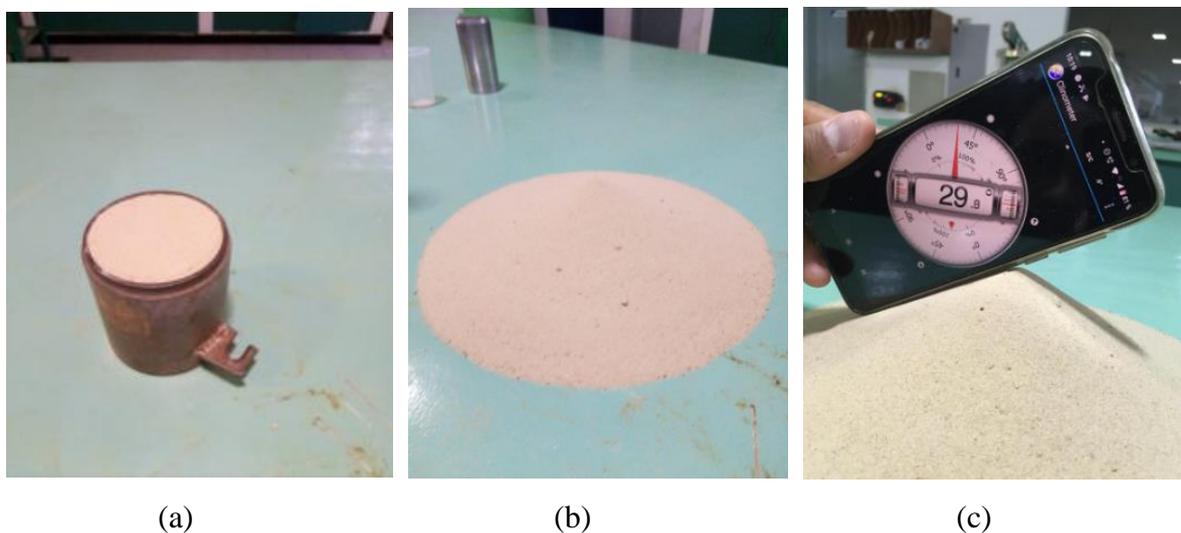


Figura 180 – Avaliação prática de deposição do material: a) Forma de CBR preenchida; b) material despejado; c) Medição do ângulo de deposição com o app. (Fonte: Própria, 2021)

A medida angular realizada com o aplicativo indicou que ângulo de deposição do material granular foi de $29,8^\circ$, sendo aproximadamente igual ao φ' no estado fofo ($e=0,88$) obtido pelo ensaio triaxial CID. Este resultado corrobora que ângulo de atrito do ensaio triaxial CID está coerente com o grau de compactação do material não denso.

Quanto ao ensaio triaxial CID da areia de Osório com $e = 0,77$ nota-se uma certa semelhança gráfica com o material com $e = 0,88$, apresentando poucas diferenças referentes às tensões cisalhantes envolvidas como se observa na Figura 181 e Figura 182. Assim como no ensaio anterior, o material apresentou um comportamento dúctil, porém a dilatância um pouco superior para tensões confinantes de 80 kPa que implicou no aumento da inclinação da envoltória típico de materiais mais compactados. Na Figura 183 pode ser vista a envoltória *Mohr-Coulomb* da areia de Osório ($e = 0,77$), com base na determinação φ_{pico} do solo, cujos parâmetros de resistência foram $c' = 0$ e $\varphi' = 35,7^\circ$.

De posse dos parâmetros de resistência, considerando os dados de Festugato (2008) e da Corte (2016), foi estabelecida uma relação de φ' para diferentes níveis de índices de vazios da areia de Osório (ver a Figura 184). Ao organizá-los, nota-se que houve uma excelente relação

linear ($R^2 = 0,919$), indicando uma certa consistência entre os parâmetros, como também apropriado para estimar o valor de ϕ' a partir dos valores de e e de campo.

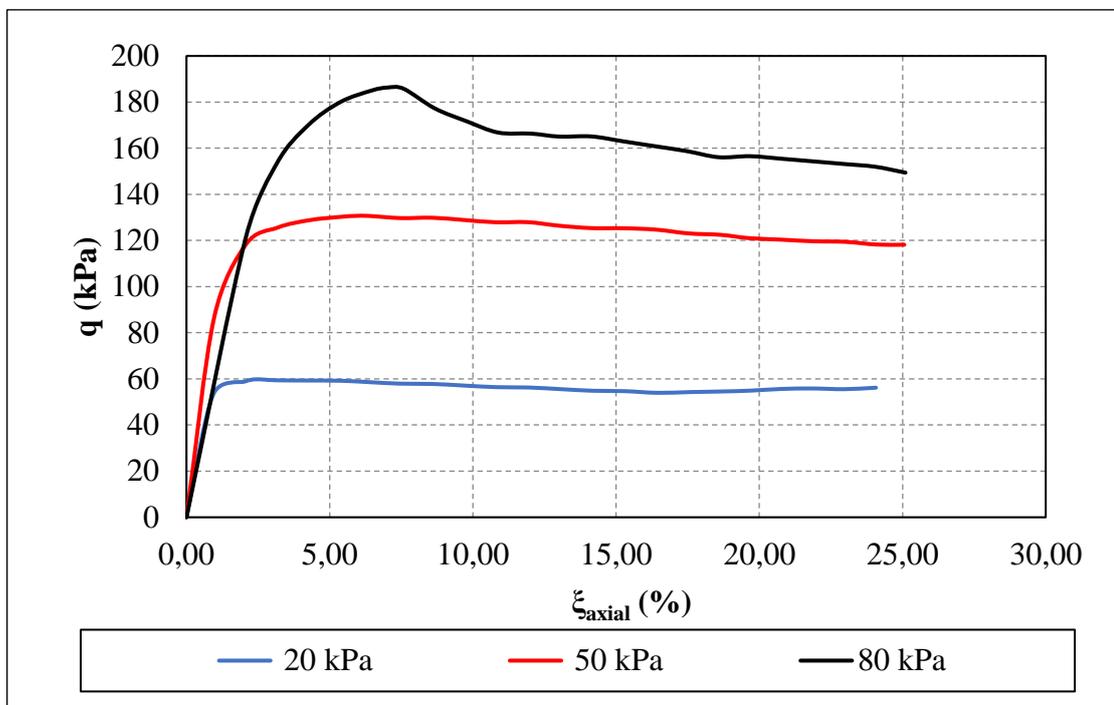


Figura 181 – Relação entre q vs ξ_{axial} do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,77$.
(Fonte: Própria, 2021)

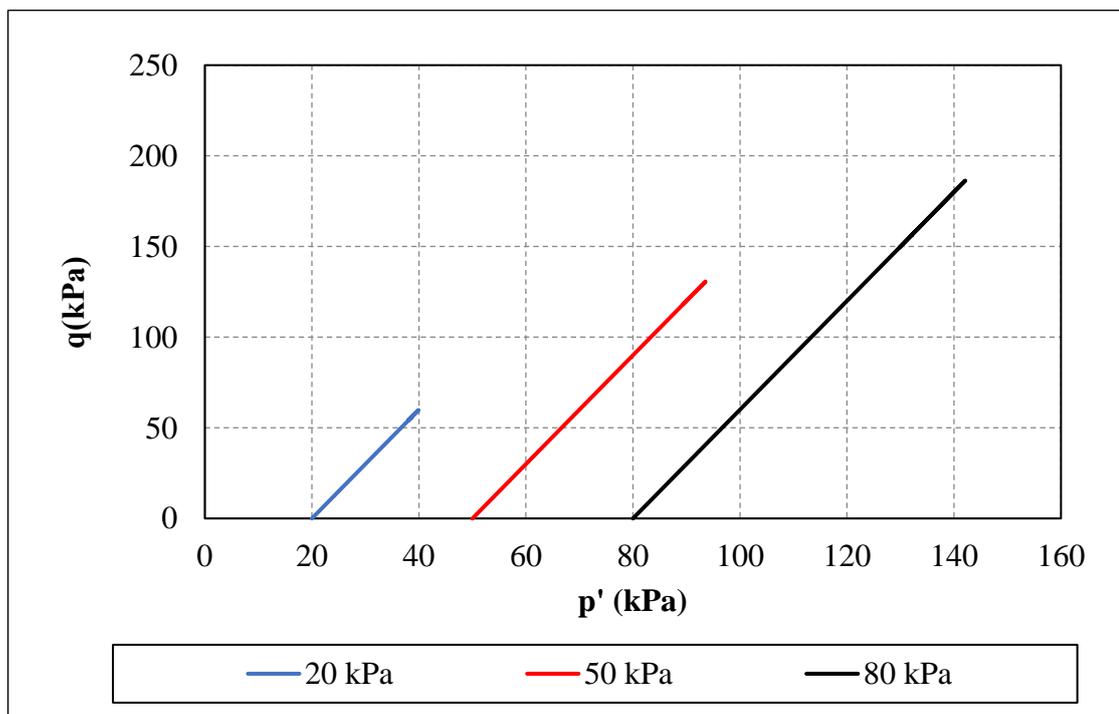


Figura 182 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,77$.
(Fonte: Própria, 2021)

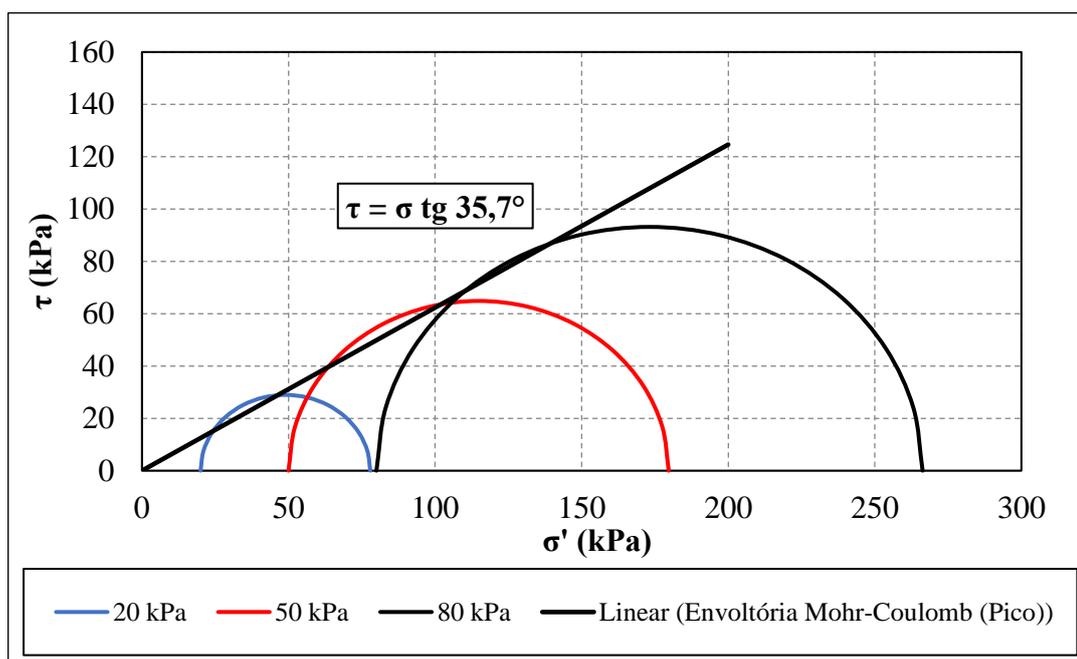


Figura 183 – Envolvória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da areia de Osório/RS com $e = 0,77$. (Fonte: Própria, 2021)

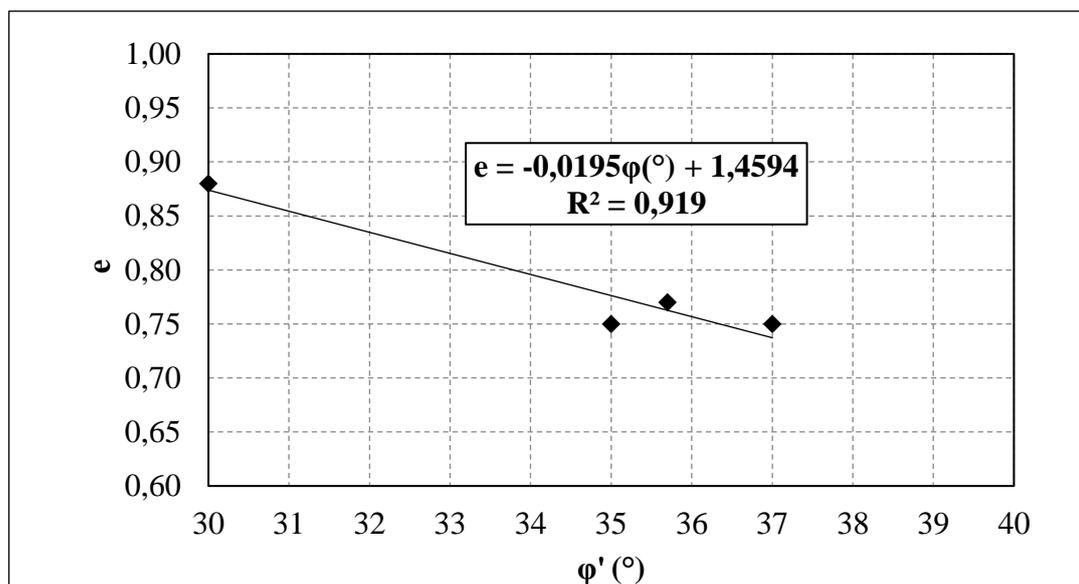


Figura 184 – Relação entre índice de vazios e o ϕ' da areia de Osório/RS. (Fonte: Própria, 2021)

Quanto ao modo de falha dos cps moldados com areia de Osório/RS, de um modo geral, todos manifestaram embarrigamento na base e distorção na extremidade superior (seção de aplicação do carregamento). O embarrigamento de base (aumento de seção transversal na base do cp) é um indício de que houve contração do corpo de prova pela redução da altura, sendo

um comportamento condizente com o grau de compactação do cp, como pode ser visto na Figura 185.

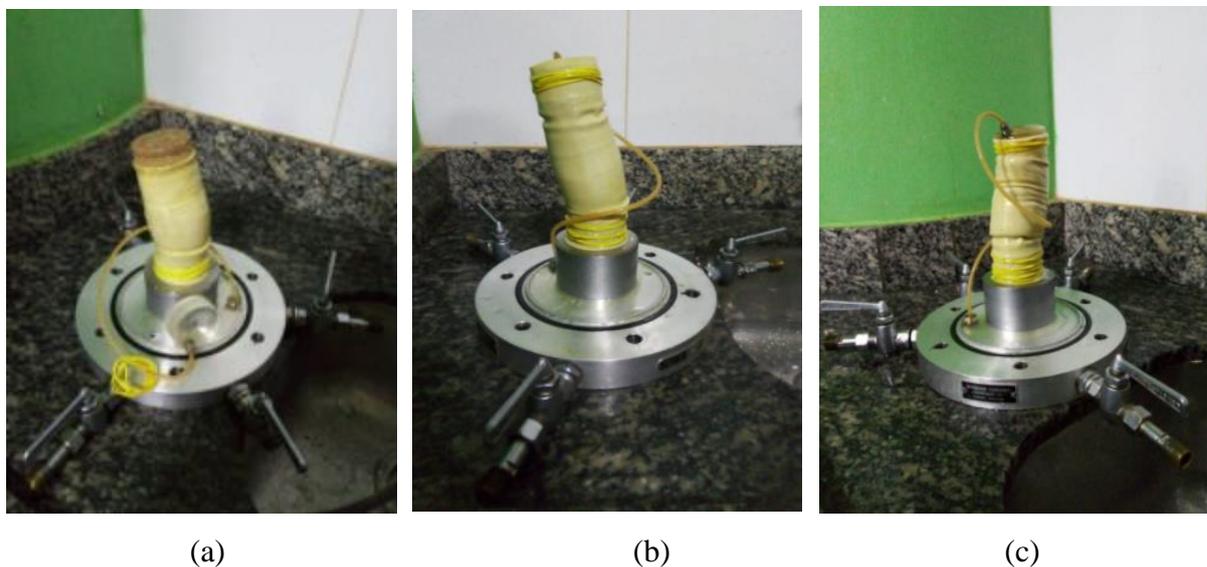


Figura 185 – Rupturas dos cps da areia de Osório/RS após o ensaio triaxial CID com $e_0 = 0,77$: a) $\sigma_3 = 20$ kPa; b) $\sigma_3 = 50$ kPa; b) $\sigma_3 = 80$ kPa. (Fonte: Própria, 2021)

6.10 RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DO TIPO CID DAS AMOSTRAS DAS CAMADAS MELHORADAS

Assim como na Areia de Osório, também foram realizados ensaios triaxiais do tipo CID das amostras retiradas das camadas melhoradas com espessura de 150 mm e 500 mm referentes às PE-II e PE-VI com valores de σ_3 iguais a 20 kPa, 50 kPa e 80 kPa, conforme Figura 186. Assim como nas areias, esses níveis de tensões confinantes foram adotados com base na magnitude dos esforços laterais existentes nas regiões mais superficiais. O comportamento tensão desviadora vs deformação axial foi classificado como elastoplástico com presença de dilatância, que é típico de materiais estruturados.

Quanto a H_{cam} igual a 150 mm apresentam os detalhes e os procedimentos organizados no Quadro 1. Do ponto de vista volumétrico, após a avaliação dos resultados dos triaxiais CID pode-se notar um comportamento dilatante, salvo o cp com a tensão confinante de 80 kPa para deformações elevadas sendo um comportamento distinto ao que se previa (ver a Figura 187).

Nota-se na Figura 186 que a rigidez inicial reduziu conforme aumento do valor de σ_3 , sendo forte indício de que houve nítida quebra de cimentação artificial do material a medida que a

tensão confinante foi elevada. Após a quebra da matriz cimentícia do material ocorreu o fenômeno de rearranjo de grãos caracterizado pelo leve aumento de resistência ao cisalhamento após a resistência ao cisalhamento máxima.

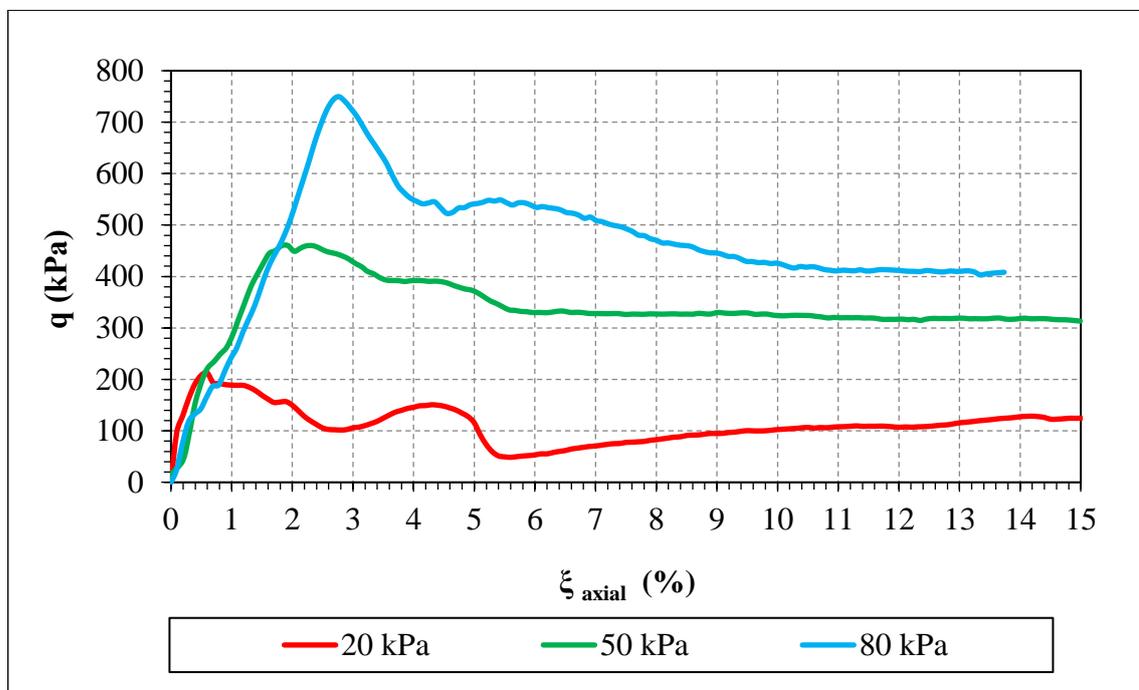


Figura 186 – Relação entre q vs ξ_{axial} do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)

De posse da envoltória *Mohr-Coulomb*, os parâmetros de resistência ao cisalhamento da camada melhorada foram $c' = 13$ kPa e $\varphi' = 54,62^\circ$ (ver a Figura 189). Em seus estudos, Clought *et al.* (1979) concluíram que o efeito do melhoramento dos solos arenosos com sílica incrementaram rigidez e coesão, contudo o ângulo de atrito não sofreu mudanças significativas. Quanto a H_{cam} igual a 150 mm, do ponto de vista volumétrico, após a avaliação dos resultados dos triaxiais CID pode-se notar um comportamento dilatante, típico de materiais compactos e/ou cimentados.

Além disso, a partir de 9% de deformação axial, em todos os cps, se constatou que a tensão desviatória manteve-se constante com o aumento da deformação axial do cp, sendo este momento caracterizado como fase de resistência ao cisalhamento residual do material, cujo efeito da cimentação artificial é insignificante.

A partir das trajetórias de tensões e a envoltória *Mohr-Coulomb* ilustradas, respectivamente, na Figura 188 e Figura 189 pode-se notar que a dilatância elevada presente no cp com σ_3 igual a 80 kPa foi a responsável pelo aumento da tensão desviatória, assim como

pelo aumento da inclinação da envoltória, conseqüentemente, elevação do valor do ângulo de atrito de pico, conforme Lee e Seed (1967) em estudos com areias compactas.

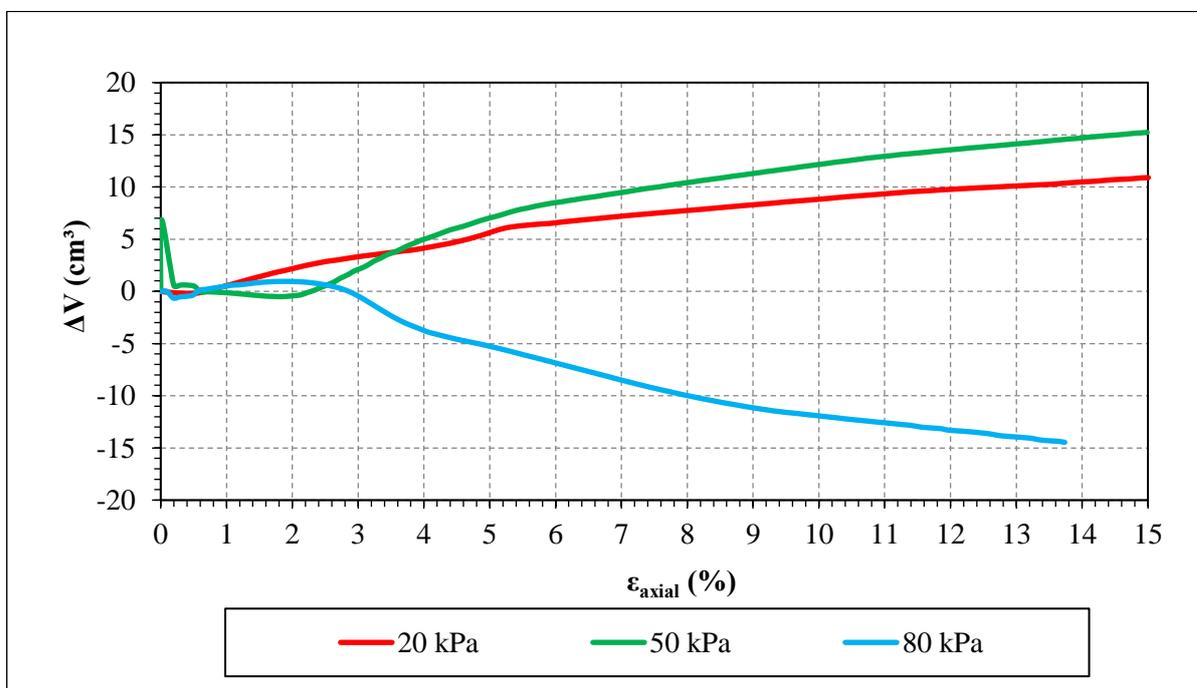


Figura 187 – Relação entre ΔV vs ξ_{axial} do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)

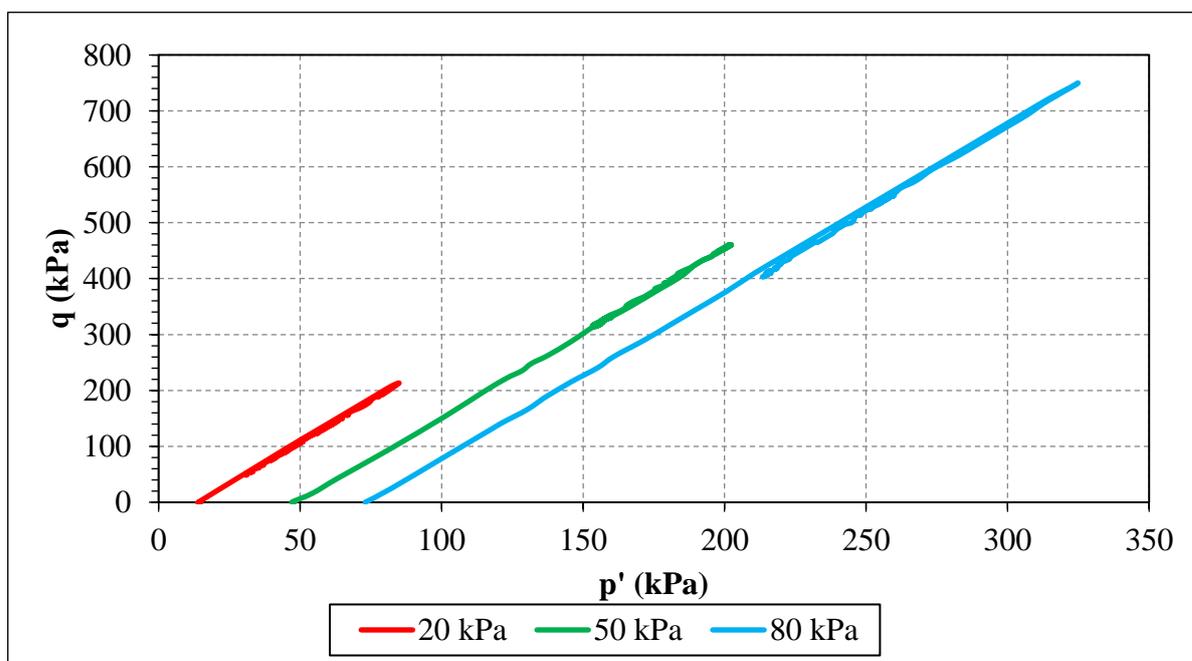


Figura 188 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)

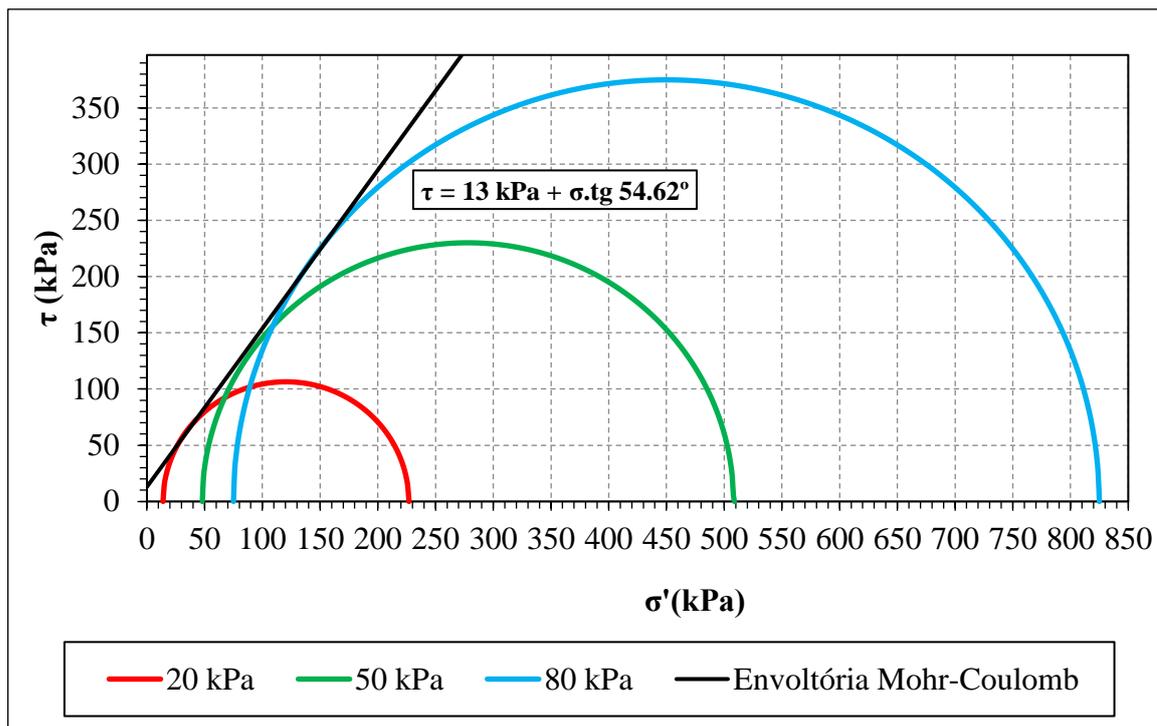


Figura 189 – Envolvória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)

Quanto aos estudos realizados com a camada melhorada H_{cam} igual a 500 mm, a resposta de tensão desviatória vs deformação axial, o comportamento volumétrico, a envoltória *Mohr-Coulomb* e as trajetórias de tensões encontram-se entre a Figura 190 e a Figura 193 com os detalhes e informações do ensaio anunciados no Quadro 2. Na Figura 190 se notou a redução da rigidez inicial conforme o aumento do valor de σ_3 devido a quebra de cimentação artificial da confinante. Após atingir a tensão desviatória máxima, se observou em todos os testemunhos de solo melhorado, que a partir de 5% de deformação axial a tensão desviatória mantinha-se constante com o aumento da deformação axial, sendo este momento caracterizado como fase de resistência ao cisalhamento residual do material, cujo efeito da cimentação artificial é insignificante. Contudo, ainda que para menor σ_3 a rigidez do solo melhorado fosse maior, a deformação volumétrica (dilatância) aumentava quanto menor fosse a tensão confinante.

Percebe-se também que as respostas de tensão desviatória vs deformação axial para σ_3 igual a 20 kPa e 50 kPa que foram semelhantes, salvo a presença da dilatância no $\sigma_3 = 50$ kPa. A ocorrência da dilatância elevada presente no cp com σ_3 igual a 80 kPa foi a responsável pelo aumento da tensão desviatória, assim como pelo aumento da inclinação da envoltória, consequentemente elevando o valor do ângulo de atrito de pico ilustrado na Figura 191, conforme Lee e Seed (1967) em estudos com areias compactas.

De posse da envoltória *Mohr-Coulomb*, os parâmetros de resistência ao cisalhamento da camada melhorada foram c' igual a 25 kPa e $\varphi' = 56,7^\circ$, como pode ser visto na Figura 193. Os parâmetros da camada com H_{cam} igual a 150 mm foram semelhantes ao da camada de H_{cam} igual a 500 mm, a baixa coesão e o alto ângulo atrito presente na areia de Osório/RS melhorada com cimento Portland pode ser parcialmente justificada pelas reduzidas tensões confinantes do ensaio triaxial.

Aliado a isso, a hipótese que pode ser considerada é que a heterogeneização da mistura possibilitou uma redução do potencial coesivo do mistura em função de uma parcial cimentação da areia acompanhada por um aumento do valor do ângulo de atrito em função da presença de torrões (grumos cimentados hidratados) internos e que por sua vez alteraram a curva granulométrica da mistura, assim como pelo intertravamento destes torrões com os grãos da areia de Osório/RS não cimentados. Esta mudança corrobora a afirmação de Clought *et al.* (1979), que afirma que a distribuição granulométrica pode afetar a resistência última da mistura.

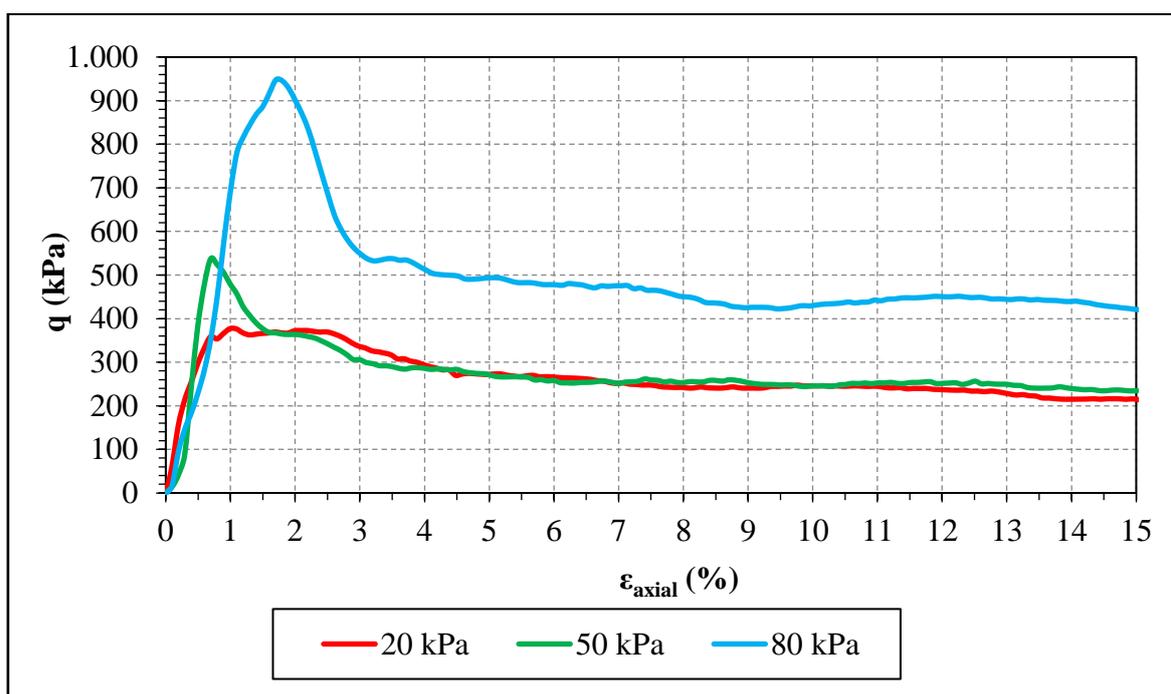


Figura 190 – Relação entre a tensão desviadora vs deformação axial do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte:Própria, 2021)

Quanto ao modo de falha dos cp extrudados da camada melhorada de H_{cam} igual a 500 mm, de um modo geral, romperam por esforço cisalhante com ângulo pós ruptura que variaram entre 65° e 67° que se encontram ilustrados na Figura 194. Este comportamento condiz com os dos materiais coesivos friccionais, como no caso, o solo melhorado com cimento. Na camada de

H_{cam} igual a 150 mm houve presença de contração volumétrica no cp com σ_3 de 20 kPa e 50 kPa, provavelmente vinculado a uma má compactação ou ineficiência na cimentação do material.

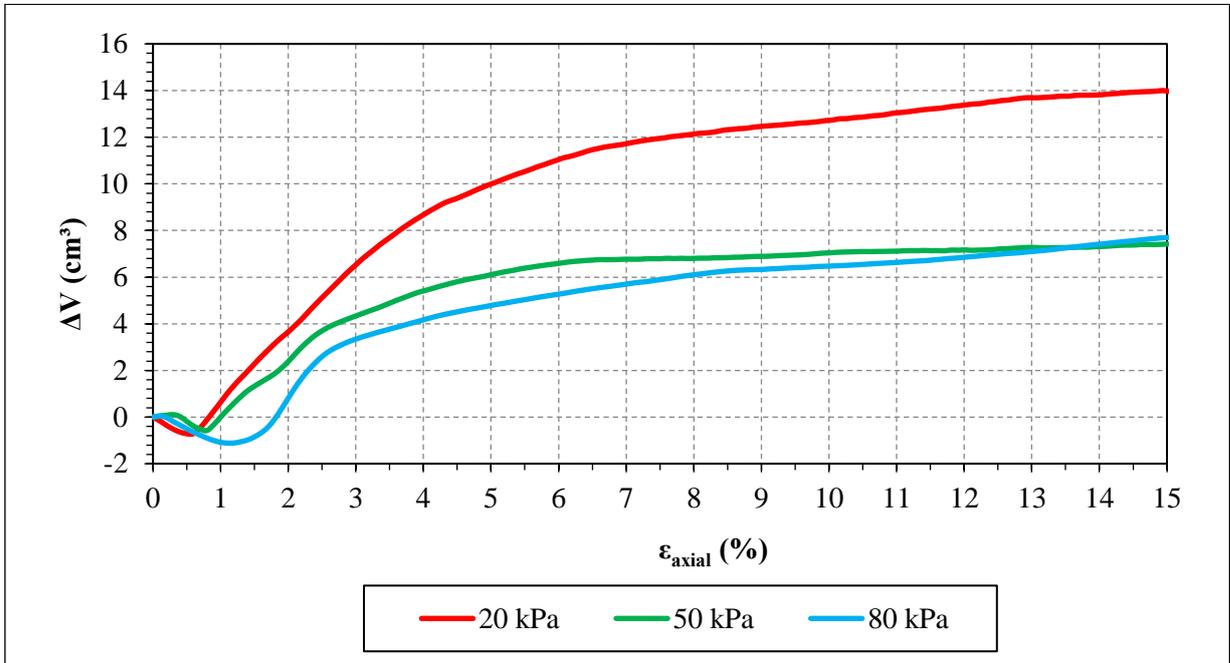


Figura 191 – Relação entre ΔV vs ξ_{axial} do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

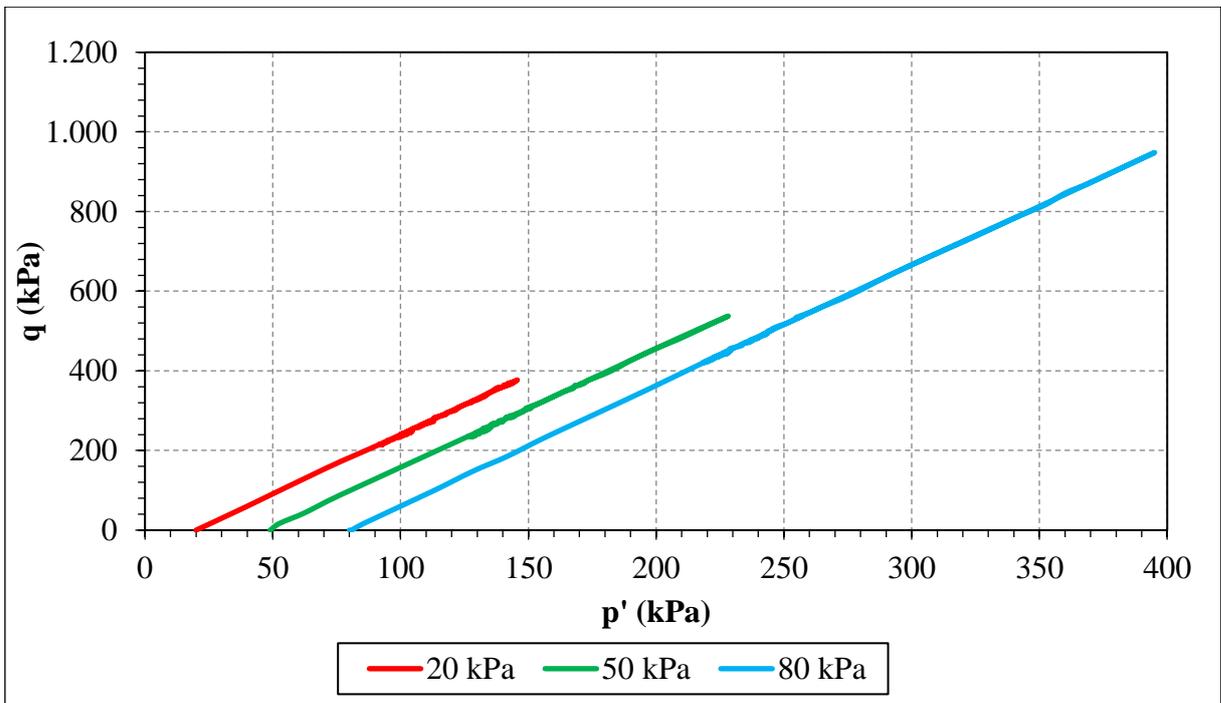


Figura 192 – Trajetórias de tensões do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

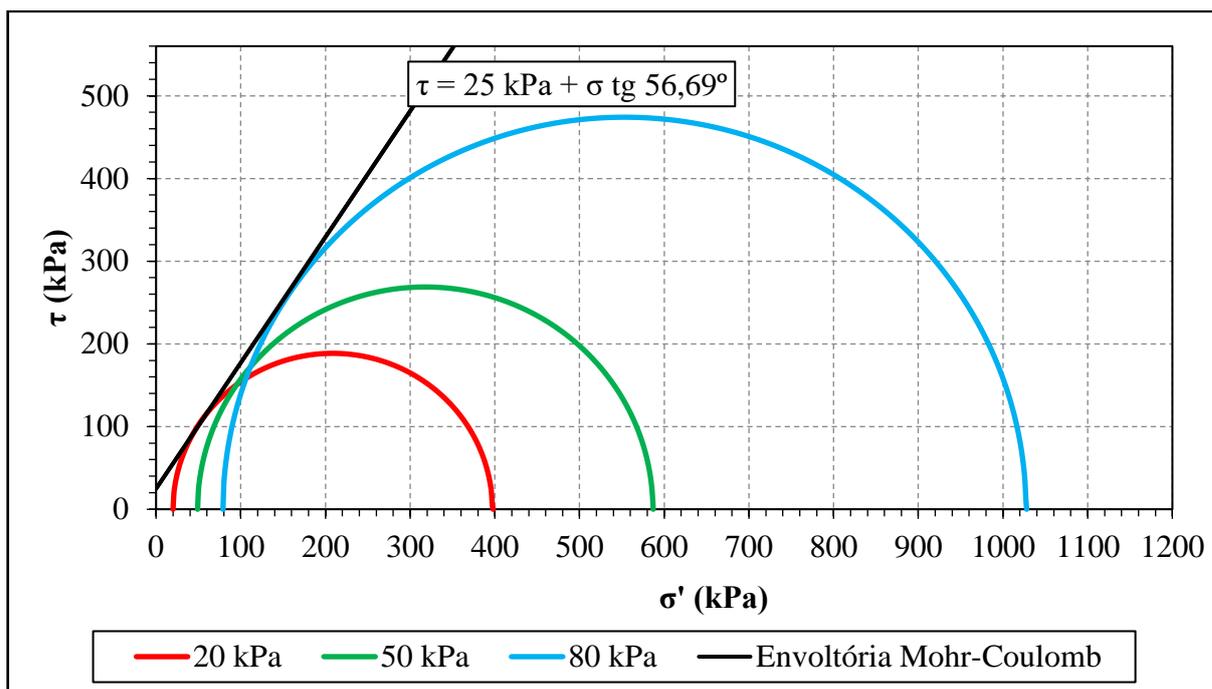


Figura 193 – Envoltória Mohr-Coulomb do conjunto amostral da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

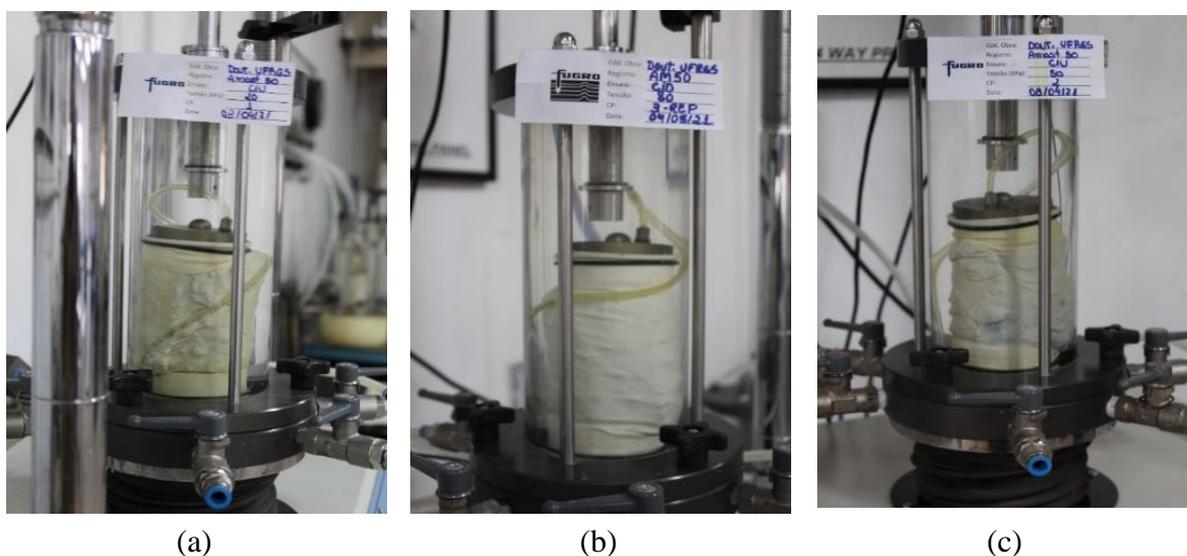


Figura 194 – Rupturas dos cps da camada melhorada após o ensaio triaxial CID do PE-VI : a) $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$; b) $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$; c) $\sigma_3 = 80 \text{ kPa}$. (Fonte: Própria, 2021)

6.11 RESULTADOS DO ENSAIO DE SPT NAS COLUNAS GRANULARES

A grande maioria dos trabalhos relacionados a avaliação do melhoramento de solo por meio do método da compactação dinâmica se dá por intermédio de ensaio de campo, como SPT,

DMT, PMT e outros [e.g, Hamidi, 2014; Tarawneh *et al.*, 2017; Sekowski *et al.*, 2018]. Estes ensaios permitem avaliar a variação da resistência à cisalhamento ao longo do perfil estratigráfico do solo melhorado. Tomando como base as boas práticas de outros trabalhos, também no presente trabalho foram realizados quatro ensaios SPT sem lavagem até cota de 5m com o objetivo de avaliar as modificações sofridas no solo com a introdução do material granular associado à compactação sofrida pelo solo após a densificação dinâmica.

A Figura 195 ilustra os ensaios de SPT realizados nas colunas granulares PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI. Baseado nos resultados, de um modo geral, pode se notar que os valores de N_{spt} variaram entre 5 e 11 com valores $N_{spt\ med}$ entre 6,6 e 8, indicando assim respostas muito similares entre as colunas. Esses valores de N_{spt} fazem correspondência ao solo no estado fofo ao compacto justamente como obtido nos ensaios de avaliação de D_r (%).

Cabe mencionar que no PE-I houve uma resistência elevada no primeiro metro comparado ao das cotas mais profundas que pode ser um indicativo de que na interação areia/argila estivesse um pouco mais compactada comparada as outras colunas, porém apresentou uma queda na cota -2 m e crescimento de resistência até -4 m para novamente reduzir no -5 m. Outro aspecto relevante que pode ser notado é de que no PE-II houve uma constância de valores de N_{spt} ao longo da profundidade. No PE-III e no PE-IV se observa um comportamento presente nos estudos de Giese (2019), cujos valores são crescentes de N_{spt} até cota -3m com posterior redução do valor de N_{spt} na cota -4 m.

Além disso, ao comparar os dados de *SPT* com os primeiros 5m dos estudos Lopes Junior e Thomé (2005) observa-se que em todos os casos nos três primeiros metros do solo os valores de N_{spt} foram maiores dando indicativos de que a melhoria pode ter ocorrido até no máximo a esta profundidade.

Por fim, tomando como referência a altura de queda de 8,0 m (altura de queda do martelo para formação da cratera) e estabelecendo que a profundidade melhoramento foi até a cota -3m é possível estimar um η_{DC} a partir da fórmula de profundidade de influência de equação de Mayne *et al.* (1984) e Mitchel (1981) com base na equação de Menard e Broise (1975) exposta na Tabela 1. Sabendo que o ensaio foi realizado no topo da coluna granular, ou seja, abaixo da superfície profundidades que variaram entre 0,35 m e 0,50 m devido a remoção da camada melhorada, com base na equação supracitada estima-se que o valor de η_{DC} estaria entre a 0,50 a 0,52. Este valor de η_{DC} é praticamente o mesmo ao obtido por Giese (2019).

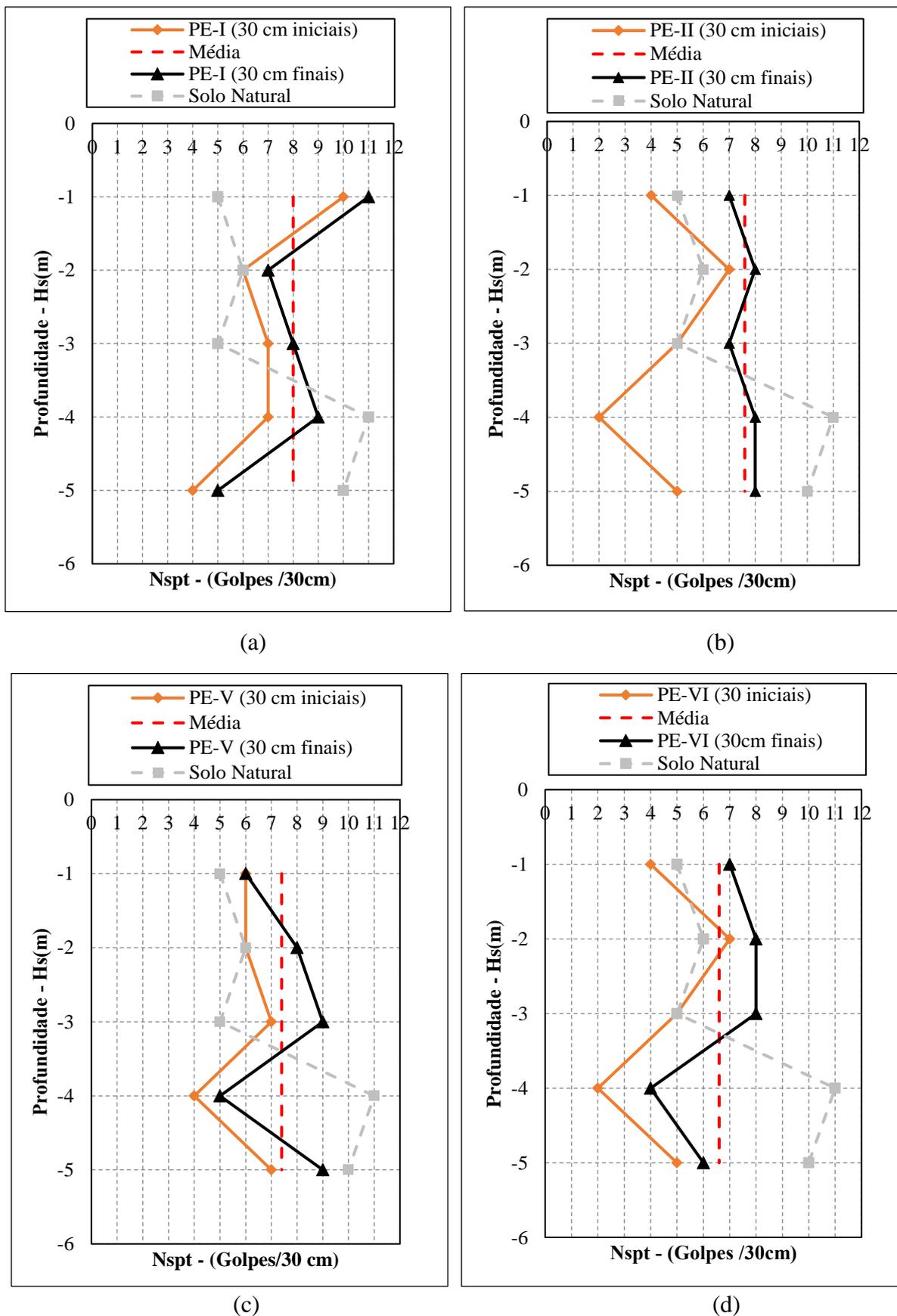


Figura 195 – Ensaio de SPT realizados no centro das colunas granulares: a) PE - I; b) PE - II; c) PE-V; d) PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

6.12 RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO LATERÍTICO ABAIXO DA COLUNA GRANULAR

Retiradas as amostras indeformadas e realizadas as devidas medições, se obtiveram os seguintes valores de γ_d em relação $\omega(\%)$ informados na Tabela 31. Como pode ser visto, os teores de umidade entre 23,32% e 27,33%, sendo os valores de γ_d enquadrados na faixa 14,23 kN/m³ a 15,78 kN/m³ e por sua vez os índices de vazios entre 0,69 a 0,801. Houve um aumento entre 24% a 37% no valor de γ_d com ao valor no estado natural obtido por Carretta (2018).

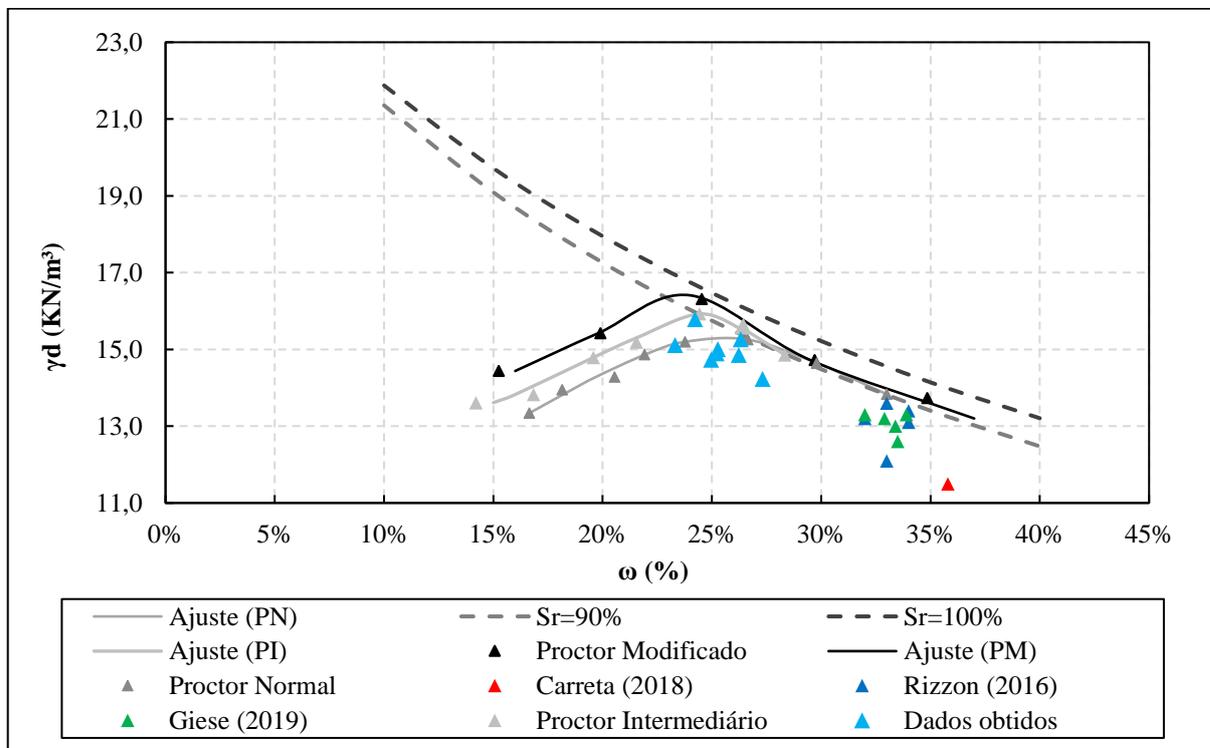
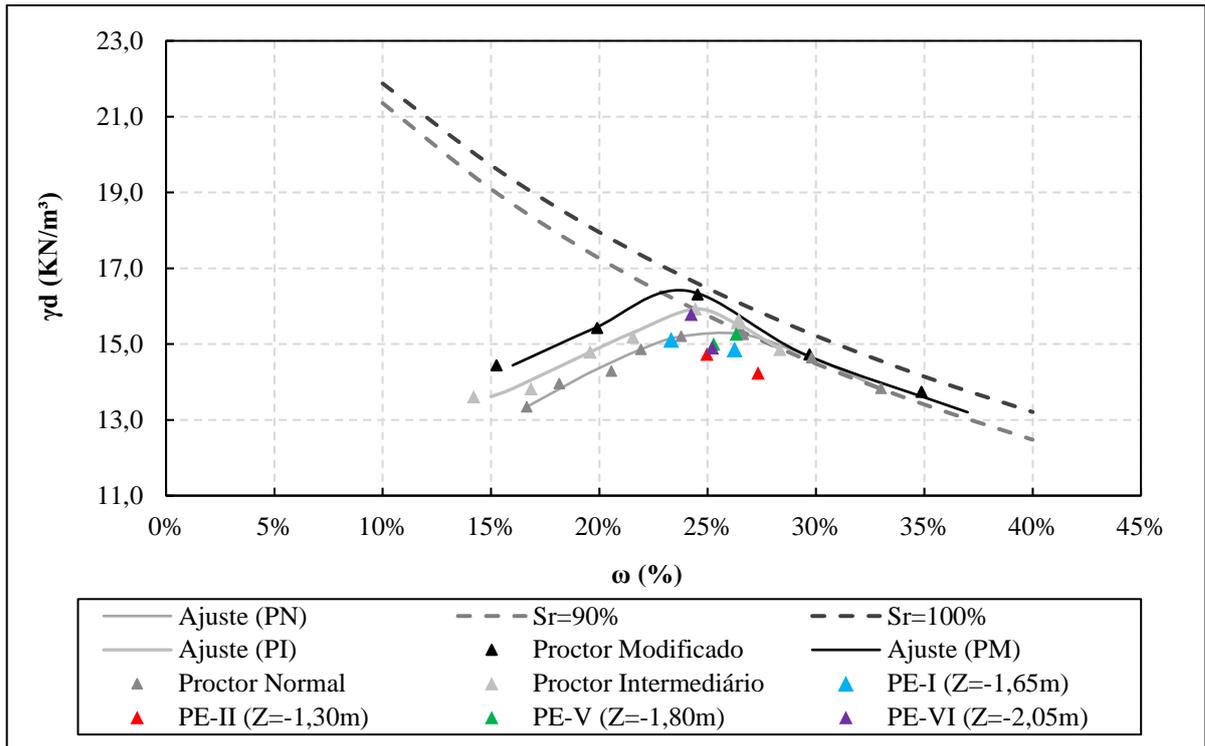
Ao plotar os dados da Tabela 31 nas curvas de compactação do solo laterítico de Passo Fundo/RS se obtém a Figura 196. Curiosamente, nota-se de que o solo imediatamente abaixo da coluna granular, considerando às condições de umidade do dia associada a energia de compactação acumulada, apresentou valores de γ_d próximos do valor ótimo para compactação em energia proctor normal.

Tabela 31 – Resultados das amostras indeformadas do solo laterítico compactado dinamicamente. (Fonte: Própria, 2021)

PE	ω (%)	γ_d (kN/m ³)	e
PE-I (Z= -1,65m)	23,32%	15,11	0,761
	26,24%	14,86	0,801
PE-II (Z= -1,30m)	24,97%	14,73	0,821
	27,33%	14,23	0,876
PE-V (Z= -1,80m)	25,27%	15,00	0,780
	26,32%	15,26	0,748
PE-VI (Z= -2,05m)	24,23%	15,78	0,691
	25,22%	14,90	0,796

Considerando a tensão de contato e a altura de queda do martelo do estudo, estes resultados demonstram que o solo laterítico de Passo Fundo/RS, ainda que tenha a sua coesão natural afetada pela ruptura da cimentação natural (Giese, 2019), pode apresentar um grau de compactidade análogo da energia proctor normal se o solo for compactado em dias mais secos e quentes.

Como pode ser notado na Figura 197, os teores de umidade apresentaram valores menores comparados aos dos dados do Rizzon (2016) e Giese (2019), de forma que a explicação pode estar ligada a possibilidade das medições terem sido realizadas em períodos chuvosos ou talvez o teor de umidade do solo esta reduzido no dia da compactação em função dos longos dias secos.



6.13 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MELHORAMENTO DE SOLO PROPOSTO

Assim como na avaliação preliminar dos efeitos das variáveis investigadas, a validação das simulações numéricas 2D foi gerada pelo *software* ABAQUS® comparadas as respostas obtidas pelo ensaio de placa dos PE's. A Tabela 32 e Tabela 33 informam os valores do parâmetro calibrados para validação do modelo numérico.

Tabela 32 – Parâmetros adotados para a validação numérica dos PE-III e PE-IV. (Fonte: Própria, 2021)

Estrato	Coluna granular		Parâmetros					
	PE-III	PE-IV	c' (MPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	Ψ	E _{young} (MPa)	ν
Areia de Osório/RS (compactada)*	1,00	1,55	1	33,5	17,9	11	20	0,3
Solo de Passo Fundo/RS	---	---	9,52	30,5	15,9	10	20	0,3
Solo de Passo Fundo/RS (compactado)	3,35	3,35	1	35,9	17,5	11	18	0,25

*Obs: Os parâmetros da placa de aço foram de $\gamma = 78,5$ kN/m³, E = 210.000 MPa e $\nu = 0,3$.

** Obs: Foi considerado um índice de vazios de 0,8 para a areia de Osório/RS.

Tabela 33 – Parâmetros adotados para a validação numérica dos PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

Estrato	Coluna granular + Camada melhorada				Parâmetros					
	PE-I	PE-VI	PE-II	PE-V	c' (MPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m)	Ψ	E _{young} (MPa)	ν
Camada melhorada	0,50	0,50	0,15	0,15	120-170	50	17,9	13-17	400	0,25
Areia de Osório/RS (compactada)*	0,60	1,00	0,75	1,10	1	33,5	17,9	11	20	0,3
Solo de Passo Fundo/RS	---	---	---	---	9,52	30,5	15,9	10	20	0,3
Solo de Passo Fundo/RS (compactado)	3,35	3,35	3,35	3,35	1	35,9	17,5	11	18	0,25

*Obs: Os parâmetros da placa de aço foram de $\gamma = 78,5$ kN/m³, E = 210.000 MPa e $\nu = 0,3$.

** Obs: Foi considerado um índice de vazios de 0,8 para a areia de Osório/RS.

A análise numérica foi desenvolvida considerando o critério de ruptura *Mohr-Coulomb* (superfície elástica perfeitamente plástica), em modelo axissimétrico e malha quadrática

estruturada com dimensões variáveis entre 5 cm e 50 cm, sendo a malha de menor dimensão concentrada na região de aplicação do carregamento e a malha com dimensões maiores mais distantes da região de maior influência. Nas simulações numéricas foram considerados o efeito gravitacional (*Step 1*) e a aplicação do carregamento vertical no solo (*Step 2*). Além disso, foram introduzidas predefinições de tensões efetivas do solo modelo.

Em termos de condições de contorno, foram introduzidos apoios fixos no eixo axissimétrico e no plano horizontal X (perpendicular ao eixo axissimétrico) e introduzidos apoios móveis perpendiculares a eixo Y paralelo ao eixo axissimétrico. Quanto as condições de interação dos materiais envolvidos, foram considerados apenas as interações entre a camada melhorada e a placa metálica ($\mu_{\text{camada/placa}} = 0,60$). Foram introduzidas condições de tensões efetivas das camadas e do solo, sendo o valor de K_0 calculado em função da equação de Jacky (1944). Foi introduzida a função *Cut off* para interrupção das tensões de tração em 11% a 13% da resistência à compressão obtida por Cruz (2008).

Em relação as camadas melhoradas com H_{cam} igual a 500 mm, a Figura 198 e Figura 199, pode ser visualizada com uma boa adequação a simulação numérica proposta em relação aos ensaios de placa de campo. Independente da profundidade da coluna granular percebe-se um comportamento elastoplástico do sistema até 10 mm, após a camada atinge a condição de ruptura progressiva, situação a qual o modelo em MEF não permite a reprodução.

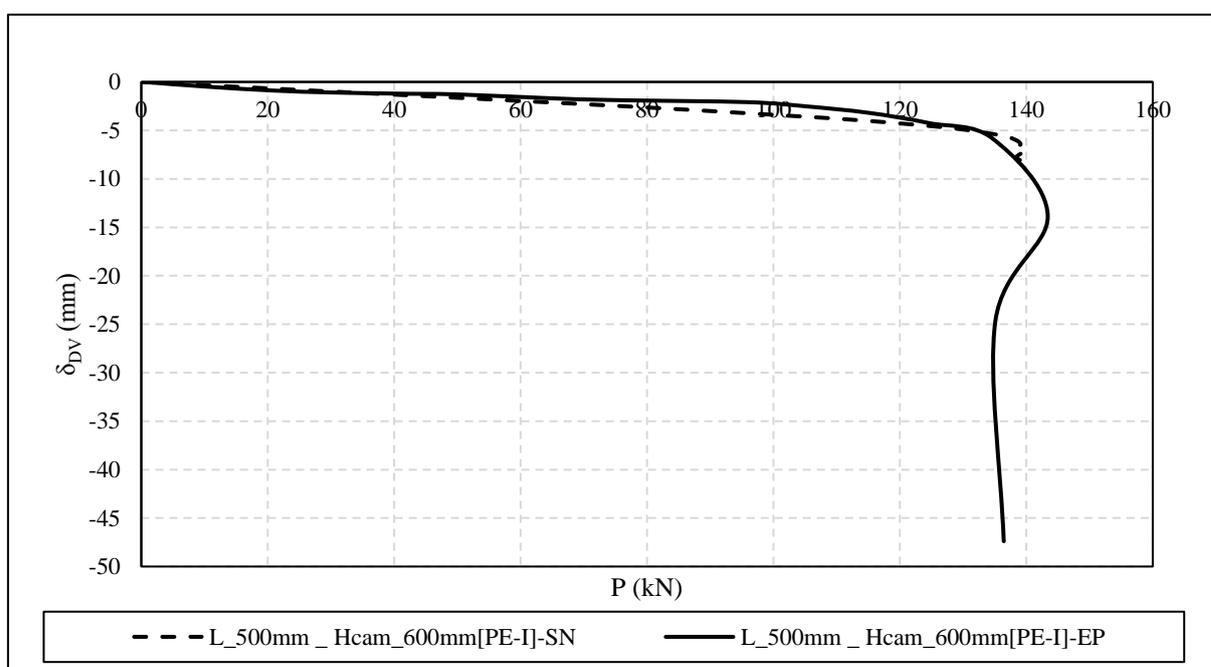


Figura 198 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-I. (Fonte: Própria, 2021)

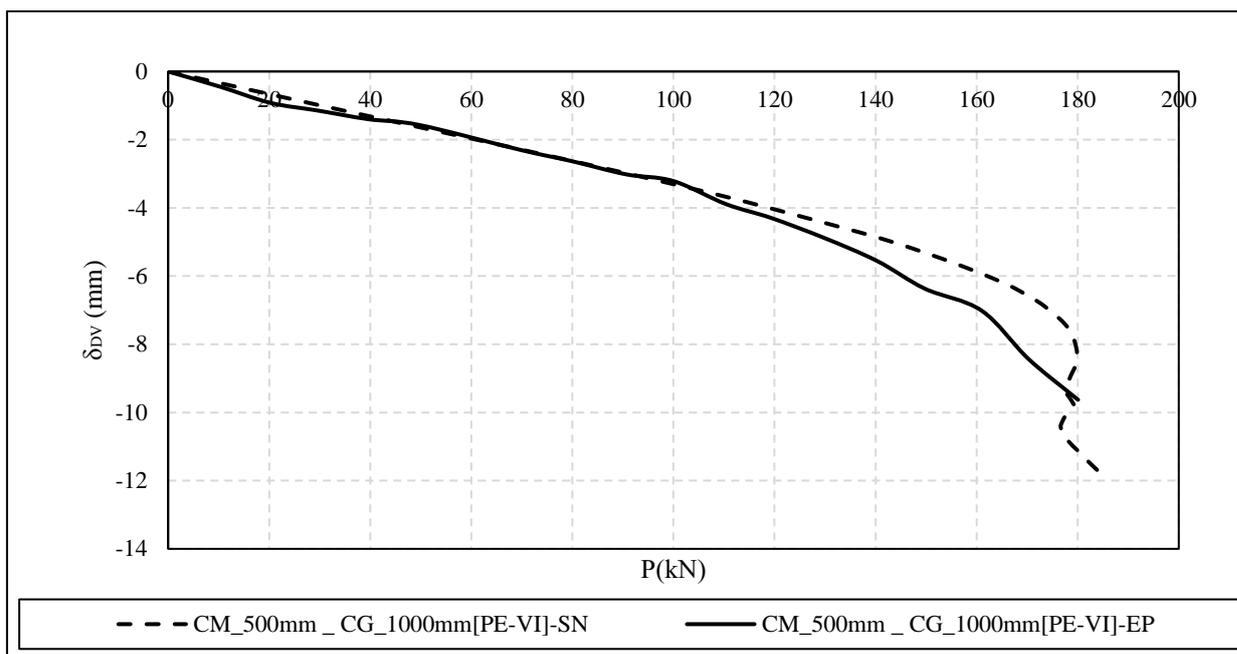


Figura 199 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

Tanto em PE-I e PE-VI, as respostas das simulações numéricas presentes na Figura 200 ocorrem de maneira semelhante. Observa-se na Figura 200a, que há uma concentração de tensões visível abaixo da região da placa e que se aproxima de um tronco de cone em revolução diante dos esforços de cisalhantes e de tração presentes. Na Figura 200b pode ser visto a ocorrência de plastificação nos contatos da camada com o solo lateral, na base e na região que seria representativa ao tronco de cone de ruptura (ver a Figura 167) e o restante da camada.

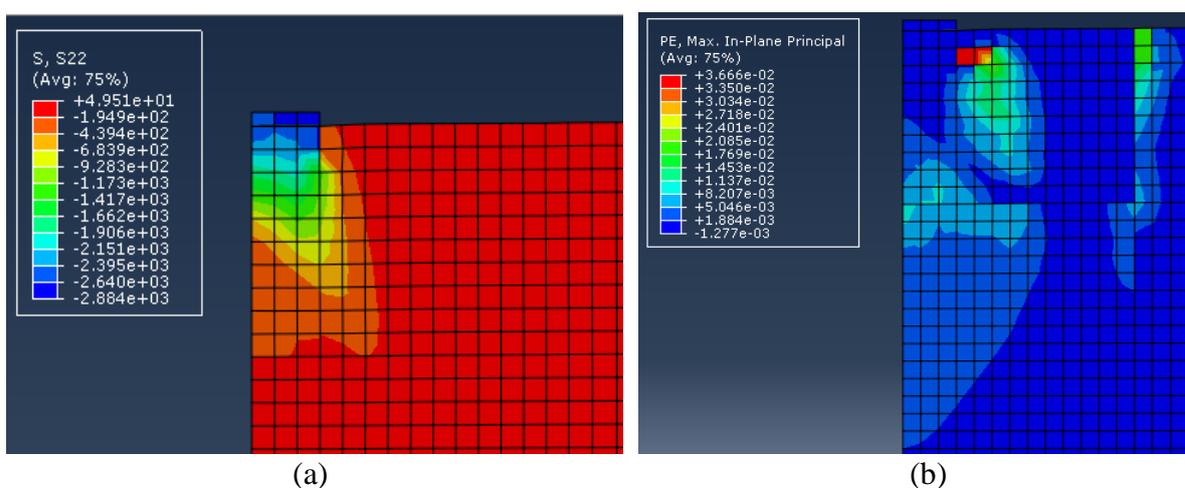


Figura 200 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-VI: a) concentração de tensões na região abaixo da placa; b) Regiões plastificadas da camada melhorada. (Fonte: Própria, 2021)

Quanto aos PE-II e PE-V percebe-se também que houve uma boa correspondência de comportamento pelo modelo numérico, conforme Figura 201 e Figura 203. Ao se atingir valores próximos de $\frac{\delta_{DV}}{D_{pl}} = 3\%$ (9 mm), o modelo conseguiu reproduzir bem o comportamento P vs δ_{DV} , contudo após atingir esse nível de deslocamento a camada se rompe e mais uma vez o MEF não possibilita a reprodução do processo de fratura do material.

Além disso, assim como nas camadas rígidas, as camadas flexíveis também concentram tensões cisalhantes no ponto de aplicação e distribuíram na seção da coluna granular como pode ser visto na Figura 202a. Ao visualizar, em termos de pontos de plastificação, se nota que há ocorrência de deformações plásticas na interface da borda da camada/solo circundante, na região representativa do espreadimento do cone fraturado devido aos esforços cisalhantes, no trecho imediatamente abaixo da placa em justamente na região de maiores esforços de tração por flexão da camada e na região da coluna granular pelo espreadimento do bulbo de tensões (ver a Figura 202b). Algo curioso é que a rigidez não foi grande o suficiente para permitir a plastificação de toda a coluna, mas apenas no centro da mesma.

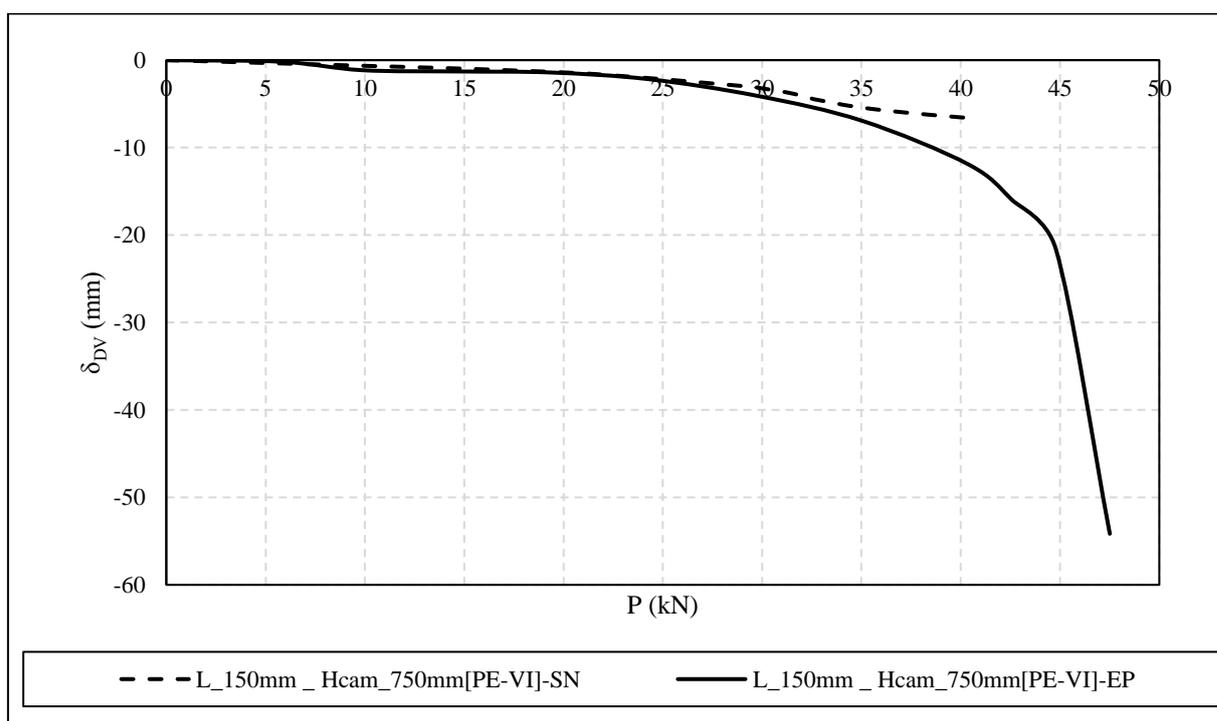


Figura 201 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-II. (Fonte: Própria, 2021)

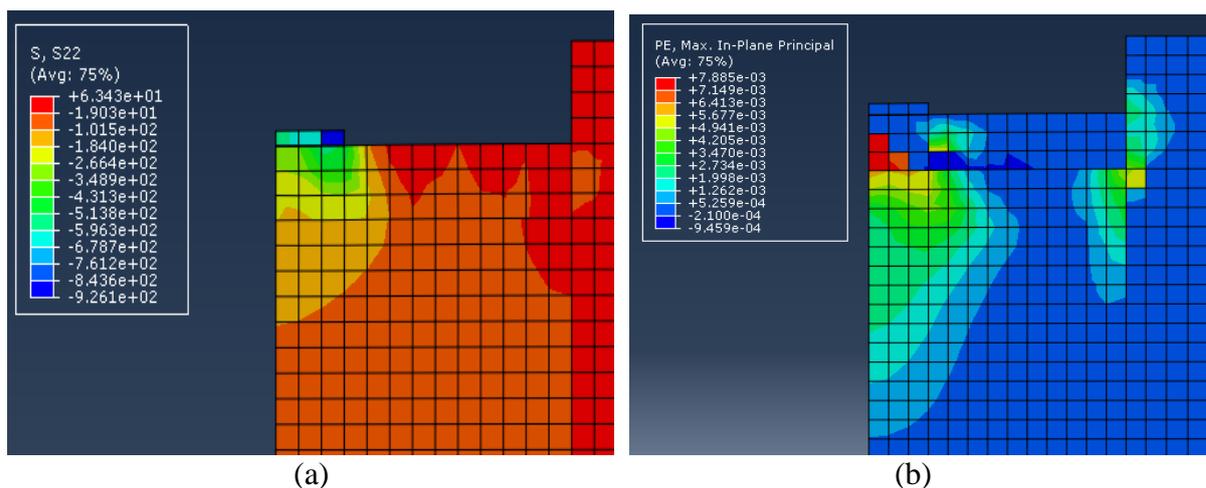


Figura 202 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-II: a) concentração de tensões na região abaixo da placa; b) Regiões plastificadas da camada melhorada. (Fonte: Própria, 2021)

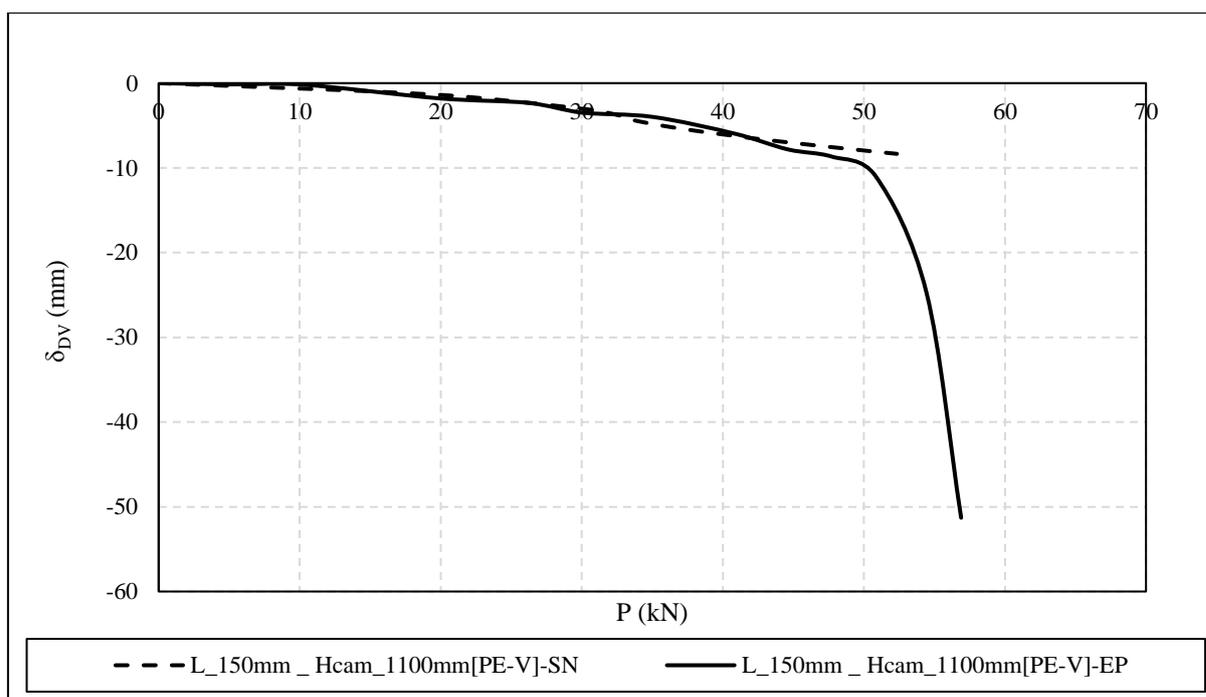


Figura 203 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-V. (Fonte: Própria, 2021)

Por fim, os pontos de estudo sem camada, PE-III e PE-IV, podem ser observados nas Figuras 204 a 207. Assim como nas comparações supracitadas, percebe-se uma boa compatibilização entre as simulações numéricas e os ensaios de placa tanto na Figura 204 como na Figura 206, o que garante que o modelo proposto descreve o comportamento P vs δ_{DV} . No ponto de aplicação do carregamento há ocorrência de um maior deslocamento total e abrangente na região da cunha plástica (ver a Figura 205a), cuja plastificação mais intensa decorre na região

periférica da placa (ver a Figura 205b). De um modo geral, em solos compactados e/ou densos homogêneos, no decorrer das transferências de esforços as bordas da placa costumam concentrar tensões cisalhantes, conforme percebido pelo Thomé (1999) e Foppa (2016). Lopes e Velloso (2012) demonstraram a ocorrência desta plastificação na região periférica da placa carregada em solos arenosos compactos e argilas rijas.

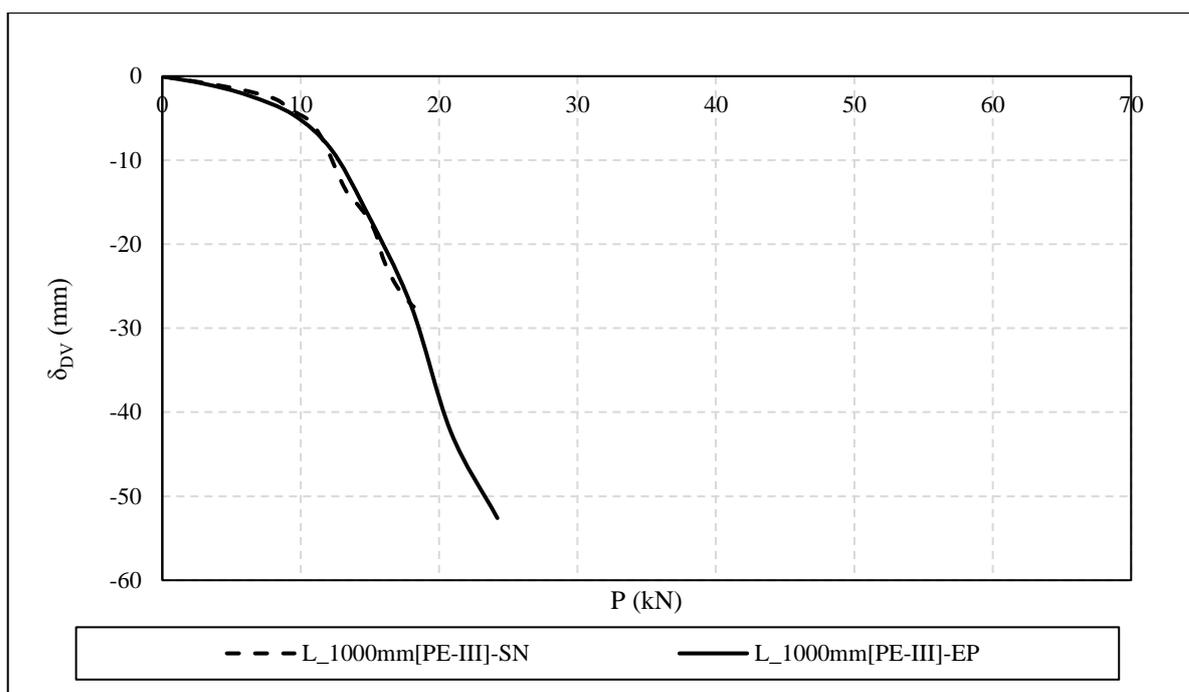


Figura 204 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-III. (Fonte: Própria, 2021)

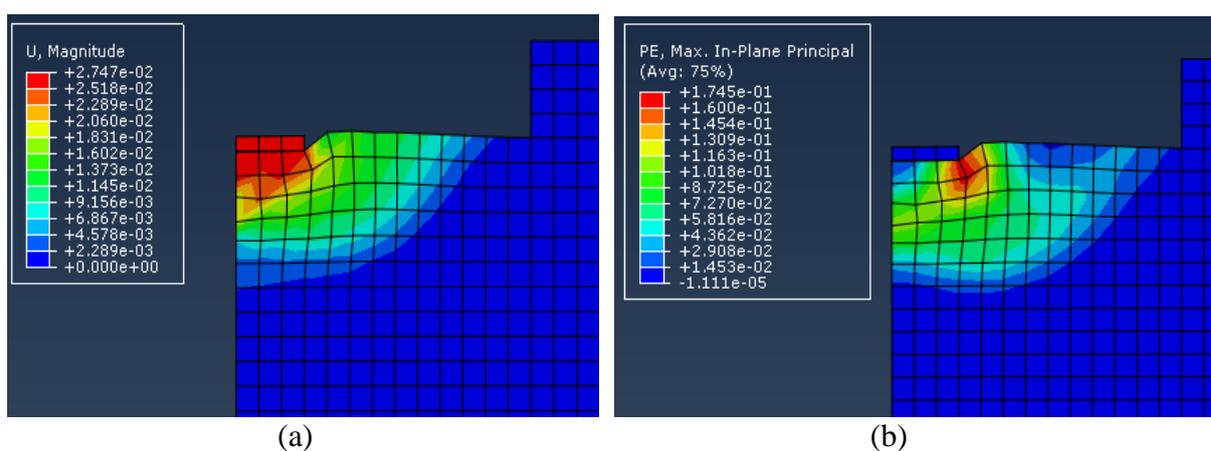


Figura 205 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-III: a) Cunha de deslocamento total; b) Cunha de plastificação. (Fonte: Própria, 2021)

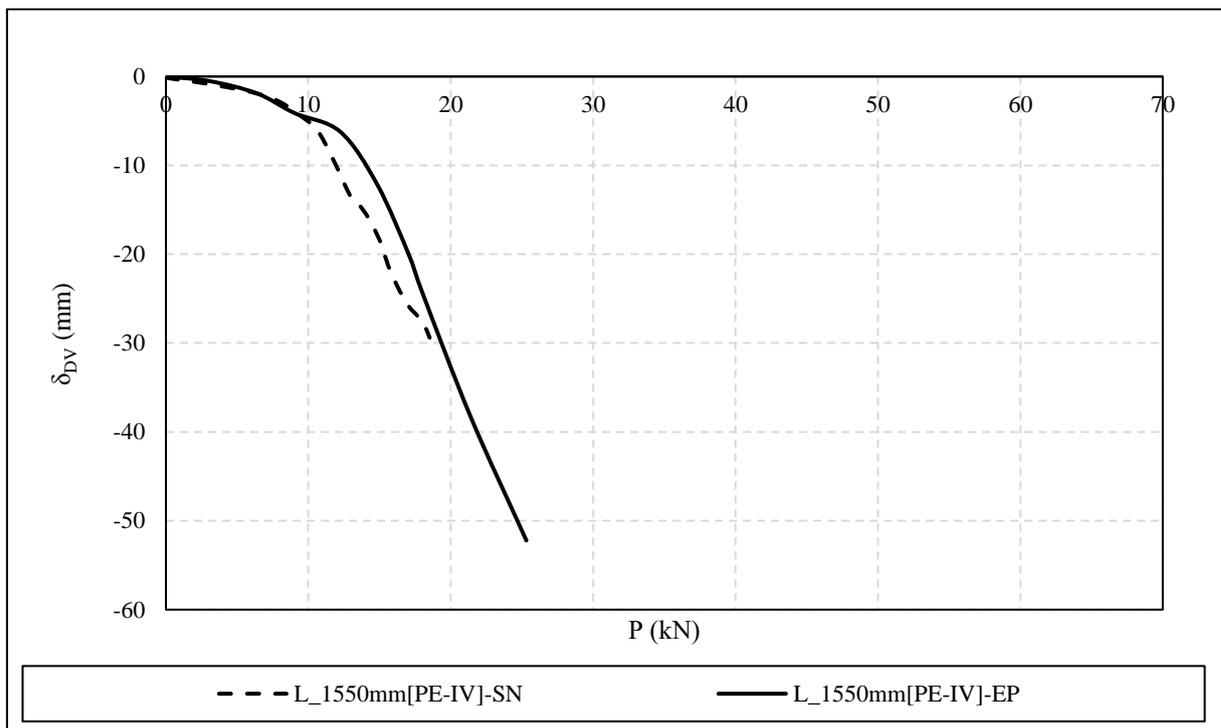


Figura 206 – Avaliação comparativa entre as respostas P vs δ_{DV} obtidas pela simulação numérica e pelo ensaio de placa no PE-IV. (Fonte: Própria, 2021)

Além disso, a presença da leve dilatância possibilitou ocorrência de uma expansão leve ao entorno da placa e um deslocamento vertical significativo na região da aplicação da carga, como pode ser visto na Figura 207a. Especificamente na Figura 207b se visualizou que o bulbo de tensões ocorreu até uma relação de profundidade de $2,5 D_{pl}$ a $3 D_{pl}$, ao que seria a base fundação superficial baseado em Barata (1984).

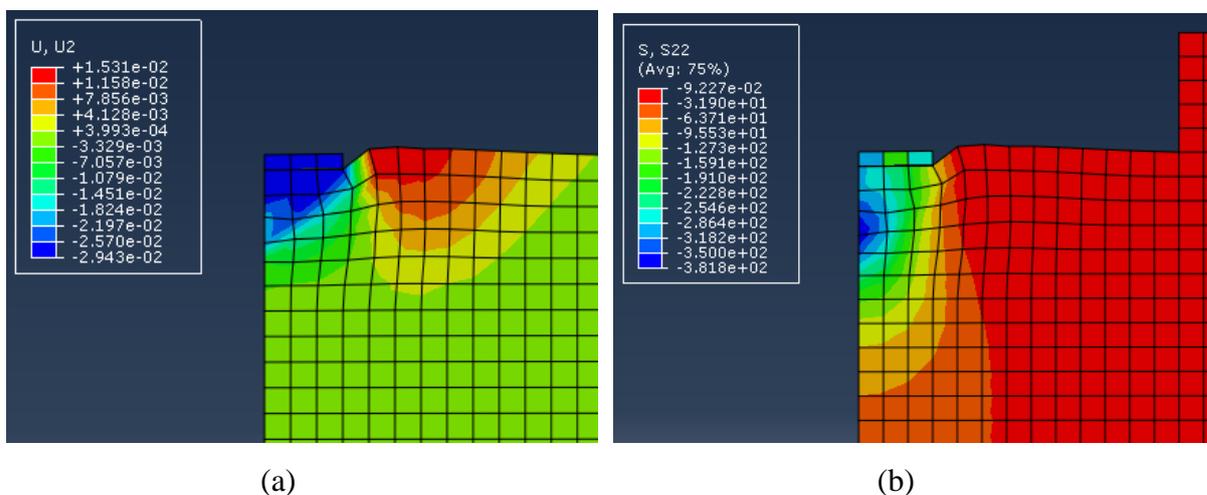


Figura 207 – Respostas do comportamento da simulação numérica 2D do PE-IV: a) Cunha de deslocamento vertical; b) Bulbo de tensões verticais. (Fonte: Própria, 2021)

Com base no comportamento expresso na Figura 206 e na Figura 207 foi possível notar a formação de cunha de plástico de ruptura nos PE-III e PE-IV similarmente ao que ocorre em situações de ruptura generalizada dos solos. Desta forma, ao avaliar a capacidade de carga do solo por meio método teórico de Terzaghi (1943) em relação D_{pl}/D_f (diâmetro da placa / profundidade de embutimento), considerando como premissas: critério de ruptura o ponto de inflexão da curva P vs δ_{DV} , (transição do estágio elástico para estágio plástico), mesmos parâmetros de resistência da areia de Osório usados das simulações numéricas (ver a Tabela 32 e a Tabela 33) e considerando que a placa encontrava-se apoiada sobre o solo granular com extensão infinita (meio contínuo) justificada pela abrangência da cunha em relação ao diâmetro da coluna de areia, percebeu-se que houve uma boa adequação das respostas (ver Figura 208).

Ao se produzir uma curva teórica variando de maneira suave o valor de D_f (baixo embutimento), se notou que o método de Terzaghi (1943) pode ser uma alternativa viável de estimativa de capacidade de carga desde que a extensão da cunha plastica ocorra apenas no interior da região da coluna DR.

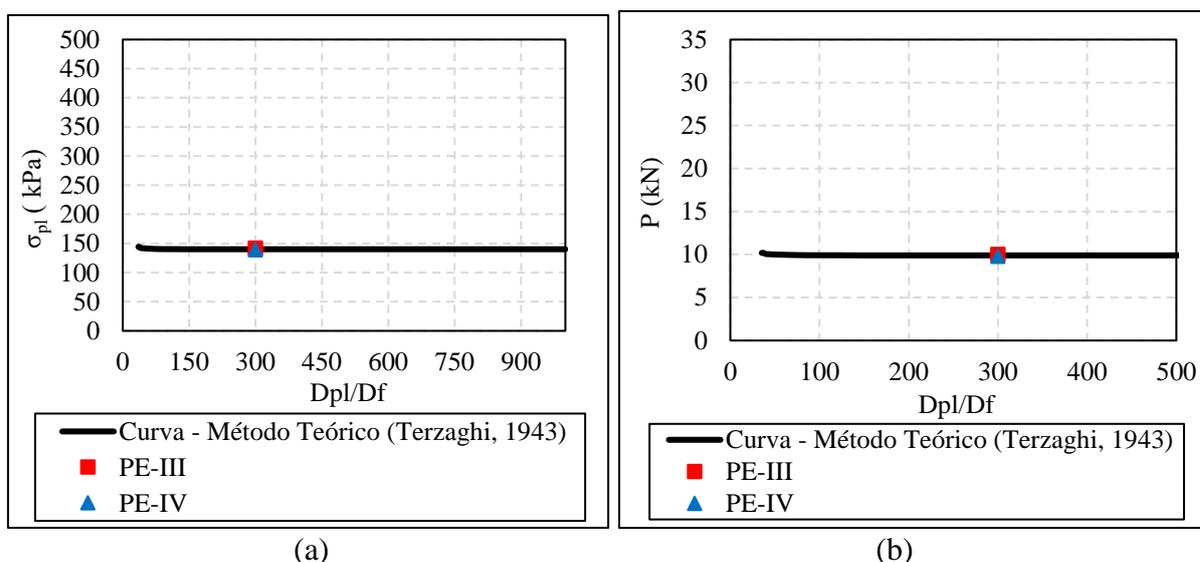


Figura 208 – Avaliação carga de ruptura do PE-III e do PE-IV em relação a respostas do método teórico de capacidade de carga de Terzaghi (1943): a) curva σ_{pl} vs D_{pl}/D_f ; b) P vs D_{pl}/D_f . (Fonte: Própria, 2021)

6.14 VALIDAÇÃO DA SONDA INCLINOMÉTRICA EXPERIMENTAL

Neste tópico foram abordados os procedimentos de calibração realizados na sonda inclinométrica experimental proposta e a sua validação a partir de uma sonda comercial.

6.14.1 Calibração da sonda inclinométrica experimental

A calibração da sonda inclinométrica experimental proposta foi realizada a partir de uma mesa de medição tridimensional ou máquina de medição por coordenada alocadas nas dependências do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-PR, em Curitiba. O equipamento de medição foi *SCIROCCO 100907* modelo *TWPH10M* da fabricante *DEA*® que realiza medições de pontos tridimensionais a partir de um transdutor óptico linear acoplado a um braço mecânico que se movimenta através de patins pneumático em três eixos e é manuseado através de um *Joy-Stick*. O equipamento possui um campo de medição de $X = 1400$ mm, $Y = 860$ mm e $Z = 660$ mm. A velocidade aproximada de 52 m/min (até 65 m/min em função *fly*) e resolução de medida de $2 \mu\text{m}$.

Como este equipamento não é usado em termos práticos para esses fins, foi criado um método alternativo para realizar a calibração. Inicialmente, foi construído um aparato de calibração (ver a Figura 209a) que, uma vez fixo na extremidade superior da sonda, possibilitava a rotação em uma direção conforme se rotacionava um parafuso. Este parafuso deslocava o corpo da sonda em uma determinada direção e que conseqüentemente gerava um ângulo de rotação. A resposta da rotação era captada pelas coordenadas tridimensionais medidas pelo transdutor óptico linear do equipamento, que por sua vez desenvolvia seções virtuais.

As seções virtuais eram criadas a partir de três pontos medidos na superfície da sonda, cujos mesmos três pontos desenvolviam um centro da circunferência (ou círculo) da peça, conforme ilustrado na Figura 209b. Ao realizar tal procedimento em duas seções, era possível construir um cilindro virtual cuja inclinação da sua geratriz possibilitava mensurar os ângulos de rotações em dois sentidos, uma principal e a outra residual (leve rotação do equipamento que gera a um pequeno erro). Quando medidos os respectivos ângulos, estes foram comparados com as respostas das leituras digitais de saída dos sensores *MEMS* instalados (ver a Figura 209c).

Após a realização dos procedimentos de calibração na sonda com base na técnica anteriormente citada, se observou que o sensor S1 apresentou uma relação linear excelente entre o ângulo e as leituras digitais do sensor, como pode ser visto na Figura 210. O valor de *offset* obtido foi igual a -57,4231 e a sensibilidade foi igual a 6500,6001.

No caso do sensor S2 notou-se um uma resposta não linear em valores próximos de 10° de leitura além de aumentarem a magnitude das leituras digitais comparados as respostas digitais diretas do sensor S1, isso se deve à conversão da saída analógica/digital. Na direção principal de leitura do sensor, ocorreu uma excelente correlação ($R^2 = 0,985$) entre os ângulos medidos

e as respostas de leituras digitais emitidas pelo sensor, como pode ser visto na Figura 211a. Porém se observou presença de ruídos de leitura em faixas extensas de LD, de -7000 a 8600 (ver a Figura 211b), ao se calibrar o sensor S1. Valores digitais estes que nas direções principais apresentariam valores significativos de ângulos de rotação e consequentemente deslocamento horizontais satisfatórios.

Após análises, se concluiu que os ruídos podem estar relacionados ao dano ocorrido durante a fase de montagem, uma vez que houve quebra da saída digital do sensor. Logo, ainda que o sensor apresente variação de leitura digital em função do ângulo de rotação se julgou não confiável para realizar as medidas do equipamento e consequentemente, ainda que funcionasse, foi desconsiderado no estudo.

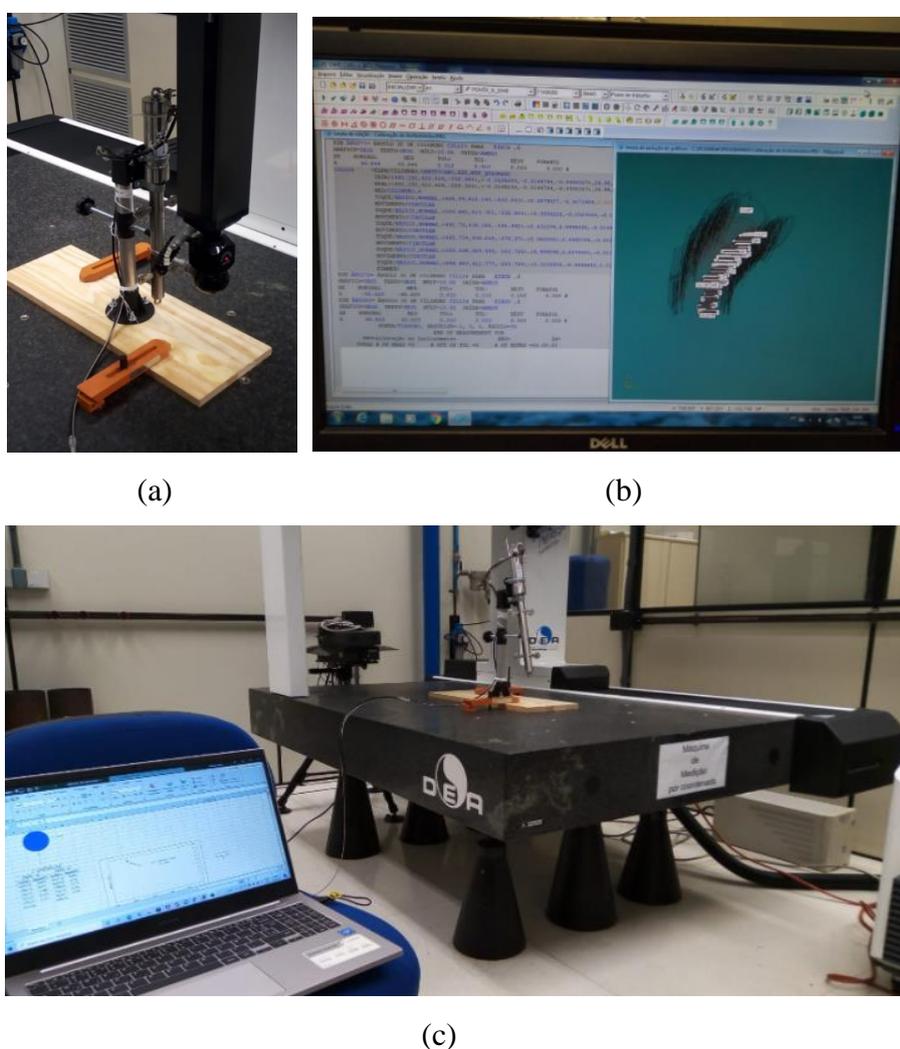


Figura 209 – Procedimentos de calibração da sonda inclinométrica: a) momento da medição; b) desenvolvimento dos cilindros virtuais; c) comparação das medidas com a leitura digital. (Fonte: Própria, 2021)

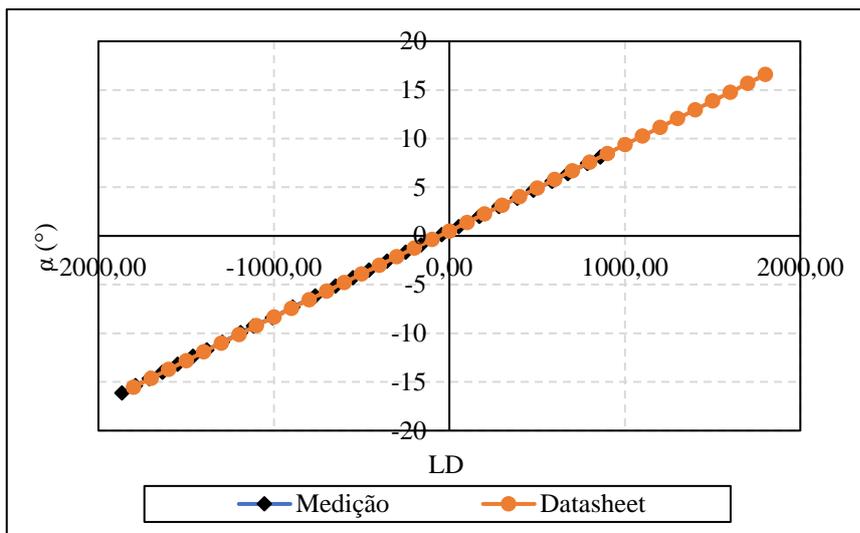
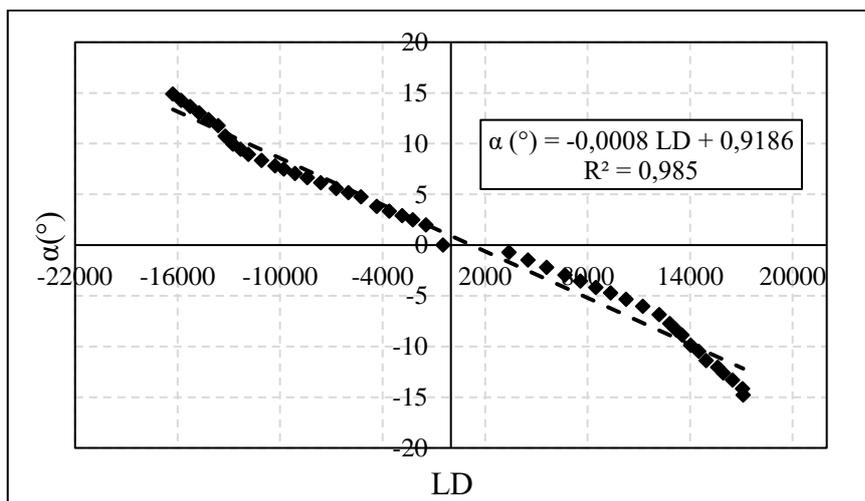
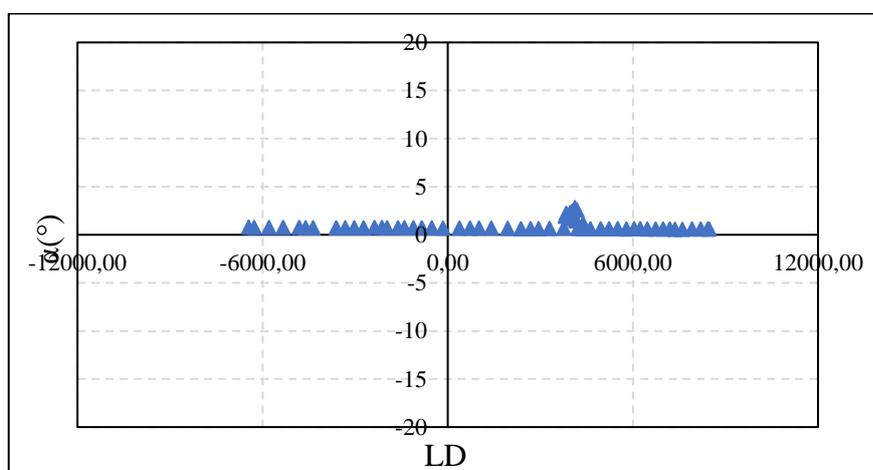


Figura 210 – Gráfico de calibração do sensor *MEMS S1*. (Fonte: Própria, 2021)



(a)



(b)

Figura 211 – Calibração do sensor *MEMS S2*: a) Direção principal; b) Direção perpendicular a principal. (Fonte: Própria, 2021)

6.14.2 Teste comparativo entre sonda experimental e a sonda comercial

Com o objetivo de estabelecer validação da sonda inclinométrica experimental, esta foi submetida a ensaio teste de leituras de deslocamento através de um tubo-guia de alumínio $\varnothing_{ext} = 85 \text{ mm}$ com L_{tubo} igual a 3,00 m fixado em um estrutura metálica nas instalações da empresa Fugro®, filial Curitiba, como pode ser visualizado nas ilustrações a seguir (ver a Figura 212). Para avaliar a sensibilidade do equipamento foram criadas distorções fictícias em pontos específicos por meio das abraçadeiras, conforme Figura 212a e Figura 212b.

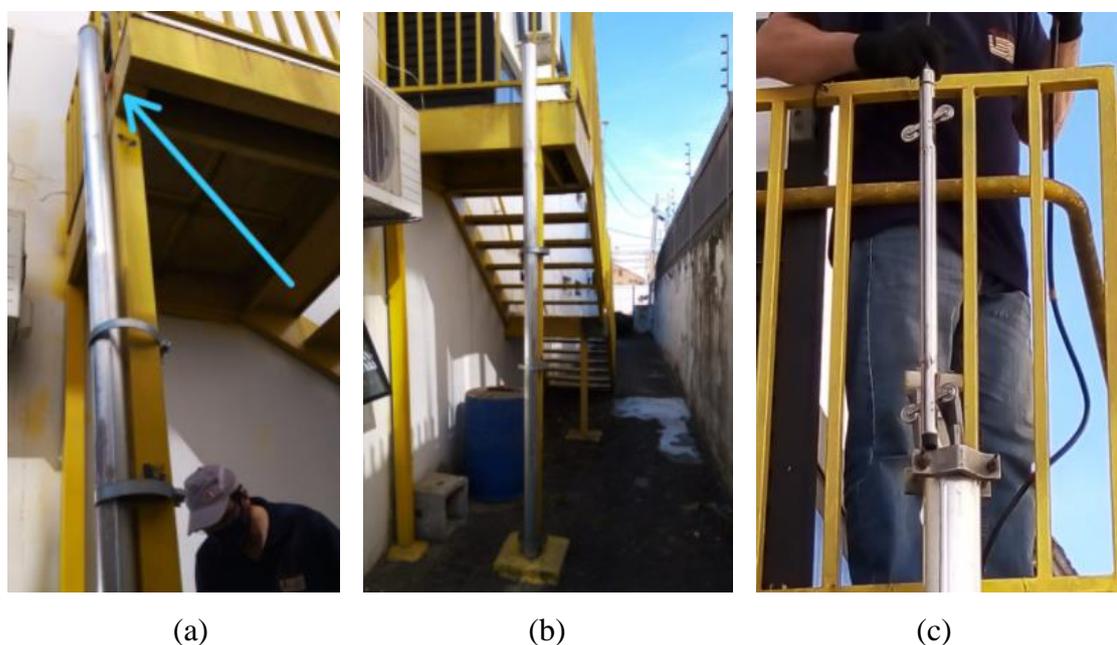


Figura 212 – Tubo-guia utilizado na validação da sonda inclinométrica proposta: a) distorção do tubo-guia no sentido Y; b) distorção do tubo-guia no sentido X; c) detalhe da introdução da sonda comercial no tubo-guia. (Fonte: Própria, 2021)

A sonda comercial utilizada para estabelecer as comparações foi a *Digitilt Datamate II* do fabricante DGSI®, conforme Figura 213a. Esse equipamento representa o modelo clássico da *Slope Indicator*, cuja leitura é obtida através de uma resposta digital do sensor que é convertida a partir da distância de eixo e do coeficiente de calibração do sensor. Ao lado, na Figura 213b, é possível visualizar o sistema de medição experimental UFRGS com a sonda inclinométrica acoplada no *notebook* com o arquivo de programação aberto.



Figura 213 – Estruturas das sondas inclinométricas utilizadas: a) *Digitilt Datamate II*; b) Sonda experimental proposta já acoplada no *notebook*. (Fonte: Própria, 2021)

O ensaio ocorreu entre as cotas $-0,5$ m e $-2,5$ m em função das restrições enfrentadas pela sonda comercial em relação ao tubo-guia instalado. Como o tubo-guia possui 3m de comprimento e a sonda possui aproximadamente 60 cm, não era possível descê-la até o fundo para realizar a medida e na parte superior houve um impedimento devido a ausência do *CAP* centralizador adequado. O teste seguiu o procedimento padrão de medidas com inclinométrico, em ambas as sondas mediu-se o deslocamento horizontal com a sonda na posição 0° e posteriormente na posição 180° , tanto no sentido X quanto no sentido Y, totalizando 4 medidas. Embora fosse adequado, não houve repetições de procedimentos de medidas pois já se sabia a magnitude do deslocamento horizontal em ambas as direções. Nas Figura 214 e Figura 215 é possível visualizar os resultados obtidos e comparar os gráficos dos deslocamentos horizontais em função da profundidade medida em ambos equipamentos.

Ao comparar respostas das curvas de deslocamento da Figura 214 e Figura 215 nota-se que as mesmas se comportaram de forma semelhante no eixo X, apresentando assim uma excelente compatibilização entre as respostas. Isto é um indicativo de que a sonda proposta se revelou eficiente e precisa com variações entre de inferiores 0,5 mm, porém no eixo Y se notou uma variação significativa entre respostas. O maior deslocamento obtido na sonda comercial foi aproximadamente igual a 8 mm, já na sonda experimental proposta foi de 17 mm. Tendo em vista que o sensor de leitura utilizado foi o S1 tanto no eixo X quanto no eixo Y, o baixo valor apresentando na sonda comercial se revelou duvidoso.

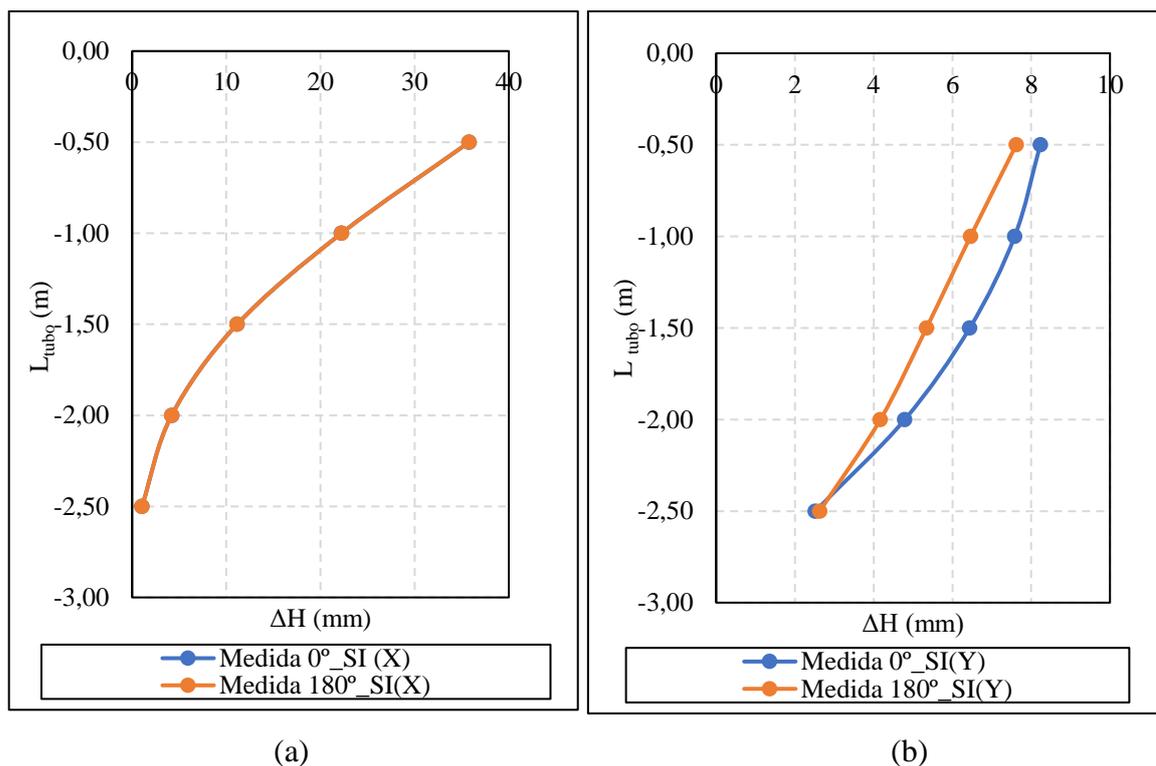


Figura 214 – Resultados dos deslocamento horizontais medidos com a sonda comercial *Digitilt Datamate II*: a) medida na direção X; b) medida na direção Y. (Fonte: Própria, 2021)

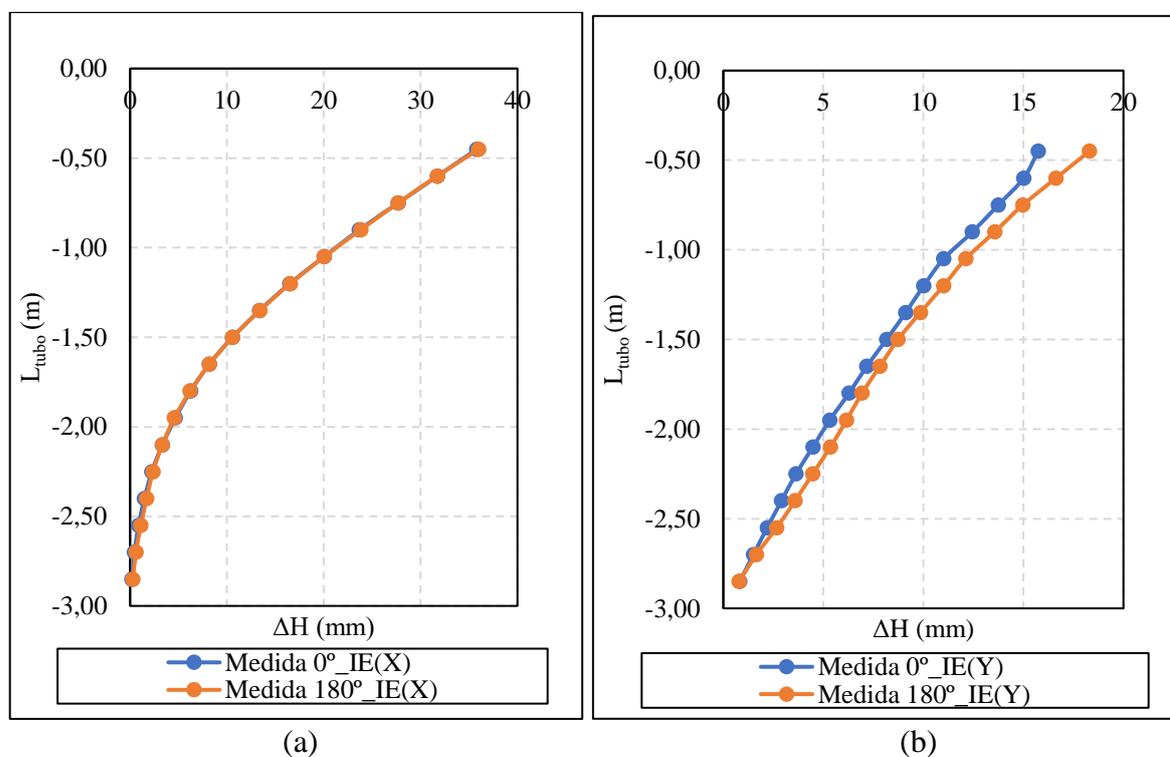


Figura 215 – Resultados dos deslocamento horizontais medidos com a sonda experimental UFRGS proposta: a) medida na direção X; b) medida na direção Y. (Fonte: Própria, 2021)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado no levantamento de informações da literatura a respeito do método foi possível declarar alguns pontos relevantes, tanto na viabilidade técnica-econômica quanto em questões socioambientais, sendo elas:

- a) Embora o método da substituição dinâmica seja difundido mundialmente, no Brasil a sua utilização é pouco repercutida por questões culturais, técnicas e financeira, sendo que há um enorme potencial da aplicação em obras extensas (indústrias, residências unifamiliares em quantidade, condomínios prediais etc.). No território brasileiro há uma gama de solos tropicais e subtropicais (residuais lateríticos e residuais saprolíticos) que apresentam condições potenciais de melhora com essa técnica. Lukas (1995) apresentou um ábaco de categorização de solos quanto a eficiência pela compactação dinâmica, entretanto essa classificação restringe-se a depósitos sedimentares, sendo inviável a sua utilização em solos coesivos friccionais residuais, conforme explicado por Rizzon (2016);
- b) No que tange a cultura e produtividade, de uma forma geral, o melhoramento de solos no Brasil se fundamenta na aplicação de geossintéticos, drenos verticais, técnica de cimentação (cimento e cales) de solos (*Jet Grouting*, *Deep Soil Mixing* e Geoenrijecimento) e outros, porém estas técnicas apresentam produtividade inferiores comparadas as técnicas de compactação (DC) e de reforço (DR) (na faixa de 15.000 a 30.000 m²/guindaste/turno/mês);
- c) A vibração gerada pelo DC e DR pode representar uma restrição á técnica em ambientes urbanos, para tanto na possibilidade de uso em locais populares faz-se necessário o monitoramento dos sismos causados pelo impacto do martelo restringindo-os a níveis que não causem danos patrimoniais (estruturais e arquitetônicos) e desconforto humano. Atualmente, algumas empresas utilizam sismógrafos instalados ao entorno das obras e monitoram os impactos do martelo em tempo real, para controlar a energia de golpes e não afetar estruturas circunvizinhas;
- d) O método de DR apresenta um caráter sustentável no que tange a forma melhoria gerada, embora exija a mobilização de equipamentos pesados, o que torna o custo de mobilização oneroso, a técnica não exige o uso de aglomerantes químicos, como cimento e cal, grande quantidade de maquinário, escavação do solo para misturas e bota-fora. Além disso, há ainda possibilidade de reaproveitamento de resíduos de demolição como material de preenchimento das crateras, segundo Tarawneh *et al.* (2017).

8 CONCLUSÕES

Baseado nas avaliações e interpretações dos resultados dos experimentos realizados no decorrer desta pesquisa foi possível obter diversas conclusões relevantes, sendo as mesmas divididas em tópicos apreciados no decorrer da tese, que foram:

- 1) Tendo em vista a importância do monitoramento, foram realizados estudos de vibrações neste trabalho e obtidos os seguintes aspectos:
 - a) Os valores da *PPV* se comportaram como previsto para as distâncias estudadas. À medida que a energia de compactação aumentava, as velocidades das ondas também aumentavam. Além disso, as mesmas ondas atenuavam conforme ocorria aumento do distanciamento da fonte, conforme expresso por Attewell e Farmer (1973), Wiss (1981) e Hwang e Tu (2005);
 - b) De forma geral, as velocidades das ondas obedeceram a um comportamento padrão de crescimento ($V_x > V_z > V_y$);
 - c) No estudo X (ver a Figura 159) pode ser percebido um comportamento interessante do *PPV* de cada golpe do martelo, independente do aumento da profundidade da cratera pós-compactação e da densificação do solo abaixo do ponto de impacto, o *PPV* de cada golpe apresentou leves oscilações na sua magnitude (entre 60 mm/s e 80 mm/s), sendo um indicativo de pouca melhoria lateral e maior melhoria na área de contato;
 - d) Ao final dos ensaios e suas respectivas interpretações pode ser proposta uma curva de *PPV* que foi comparada com os trabalhos de Mayne *et al.* (1984), Mayne (1985), Dowding (2000) e Rollins e Kim (2010). Ao plotar as curvas dos respectivos trabalhos em um mesmo gráfico (ver a Figura 161) percebeu-se que a curva proposta apresentou um comportamento intermediário comparado aos trabalhos de Dowding (2000), estudos em variados solos, e de Rollins e Kim (2010) solos colapsíveis americanos, sendo essa resposta compatível ao tipo de solo estudado;
 - e) Para as energias estudadas, as frequências de maiores energias enquadraram-se a valores entre 3Hz e 20 Hz, salvo alguns poucos casos que apresentaram comportamentos incomuns. Essa faixa de valores se aproxima das faixas expressas por Menard e Broise (1975), Mayne *et al.* (1984), Slocombe (2013) e Hamidi (2014).
- 2) Quanto ao gatilho da compactação dinâmica foi possível observar, que as premissas e os materiais utilizados no dimensionamento atenderam a proposta de funcionamento do dispositivo, de forma que:

- a) Como percebido, ao realizar o cálculo do $F_{s_{min}}$ da peça foi obtido um valor de 1,917 (sem plastificação). Tendo em vista que as concentrações que ocasionaram a redução do F_s foram pontuais pode-se concluir a peça de fato começou a apresentar plastificações mais proeminentes com F_s igual a 3,938, ou seja, com um nível de segurança superior em 294% a carga de ruptura estimada;
 - b) A ligação da trava/alavanca com cabo metálico demonstrou ser ineficiente quanto aos esforços de cisalhamentos produzidos durante o acionamento do dispositivo. A otimização do acionamento da trava por meio de chapa de articuladas parafusadas, não apenas permitiu maior resistência e facilidade, como também centralizou melhormente a trava no corpo fixo do gatilho (distribuição do atrito nas faces da trava).
- 3) Para compreender como se deram as formações das colunas granulares, trincas, anomalias e outros aspectos que viessem ocorrer ao longo da sua extensão, foram realizados trabalhos de exumação das colunas PE-III e PE-IV. Com isso, alguns aspectos foram observados nestas colunas:
- a) Na PE-III se constatou formações de contornos parabólicos justamente na interação entre camadas, dando indicativos de como ocorreu a compactação do material granular, esses contornos representam deformações volumétricas plásticas sofridas pela coluna no momento da compactação dinâmica, sendo um comportamento similar ao obtido por Oshima e Takada (1997);
 - b) Ao realizar o corte da PE-III se pode comprovar a nítida ruptura localizada (afundamento central com pequenas trincas localizadas) do material, justificando assim a baixa capacidade do material substituído e comportamento P (kN) *vs* δ_{DV} (mm) obtido pelo ensaio de placa (ver a Figura 173);
 - c) No PE-IV foi testemunhado uma quantidade material viscoso na base da coluna (ver a Figura 174), que provavelmente se formou pela concentração de água. A DC densificou o solo natural local na área de contato e conseqüentemente reduziu a sua condutividade hidráulica. Esse fenômeno merece atenção, e, portanto deve ser considerado no momento da aplicação em situações semelhantes.
- 4) Quanto aos ensaios de placa realizados diretamente na camada superficial, PE-I, PE-II, PE-III, PE-IV, PE-V e PE-VI e percebidos os seguintes aspectos:
- a) Ao comparar a resposta de P *vs* δ_{DV} do solo virgem (Horizonte B) obtido por Dalla Rosa (2004) com o resultado obtido na camada superficial (Horizonte A) notou-se uma distinção

- no comportamento resistente e deformável. A camada superficial apresentou maior rigidez e maior resistência quanto ao cisalhamento, vinculado a magnitude da sucção total elevada e provavelmente ligada a concentração de óxidos, bases químicas e outros componentes à base de sílica;
- b) Quanto a profundidade da coluna, ao comparar os PE-III e PE-IV se constatou que a variação da profundidade coluna não gerou mudanças significativas no comportamento da curva P (kN) vs δ_{DV} (mm). Teoricamente, o bulbo de tensões formado pela placa $D_{pl} = 300$ mm é curto (com profundidade de $2D_{pl}$ a $3D_{pl}$, dependendo das condições do solo), e como as colunas apresentaram profundidades superiores as profundidades destes bulbos com graus de compactação similares, as respostas foram semelhantes (ver a Figura 162);
 - c) Ao comparar as respostas das espessuras das camadas melhoradas (ver a Figura 162, Figura 163) constatou-se que a espessura da camada H_{cam} foi o parâmetro com peso mais significativo no estudo. Considerando o critério de ruptura como $\delta_{DV}/D_{pl} = 3\%$ (ver a Figura 164), nota-se que a camada H_{cam} igual a 150 mm aumentou em 200% a capacidade de carga, já ao introduzir uma camada H_{cam} igual a 500 mm houve aumento da 900% a 1200% da capacidade resistente do solo;
 - d) Ao analisar o resultado do solo natural compactado por Giese (2019) e comparar com os resultados das colunas granulares sem camadas (PE-III e PE-IV), considerando os critérios de ruptura δ_{DV}/D_{pl} e de Terzaghi e Peck (1967), percebeu-se que as colunas granulares apresentaram rigidezes e capacidade resistentes superior ao do solo compactado dinamicamente;
 - e) A mudança do material de base repercutiu em mudanças no comportamento elastoplástico do solo. Giese (2019) demonstrou que o comportamento da camada melhorada apoiada sobre o solo compactado dinamicamente tendeu a manifestar um endurecimento com a aplicação da carga. Contudo, ao avaliar as respostas de P (kN) vs δ_{DV} (mm) (ver a Figura 165) dos PE's com a melhoria proposta, se verificou um padrão de comportamento dúctil.
- 5) Quanto aos ensaios q_u e S_m dos testemunhos extrudados e ensaio de sucção dos PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI e percebidos os seguintes aspectos:
- a) Os valores da resistência à compressão não confinada dos testemunhos variaram, aproximadamente, entre 0,5 à 0,9 MPa devido às dificuldades com a homogeneização da mistura, como pode ser visto na Tabela 28. Ainda assim, os valores de CV (%) se

- aproximaram de 10%, sendo um indicativo de que ainda houvesse variações de resistência entre pontos de estudo, eram homogêneos nas respectivas camadas;
- b) Ao avaliar os ensaios de sucção matricial foi constatado que as camadas não se encontravam em condições saturadas, uma vez que os resultados através do papel filtro apresentaram, em média, valores entre 200 kPa e 4000 kPa. Portanto, a resistência ao cisalhamento das camadas melhoradas foi influenciada pelo efeito sucção matricial.
- 6) Como mencionado ao longo do trabalho, foram realizados ensaios de SPT nos PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI e percebidos os seguintes aspectos:
- a) Ao longo de profundidade os valores de N_{spt} variaram entre 5 e 11 golpes com valores de $N_{spt \text{ médio}}$ entre 6,6 e 8 golpes. Giese (2019) obteve respostas de N_{spt} na faixa 5 de 10 golpes em seus estudos de compactação dinâmica. Desta forma, mesmo com substituição de material, os valores situaram-se em faixas próximas;
- b) Assim, como obtido por Giese (2019), a profundidade de melhoramento se situou na cota - 3 m do solo;
- c) A partir dos critérios de compactação para formação da cratera, com base na da fórmula de profundidade de influência de equação de Mayne *et al.* (1984) e Mitchel (1981) com base na equação de Menard e Broise (1975), o valor do η_{DC} estimado se situou entre 0,50 a 0,52, sendo assim o mesmo valor de η_{DC} obtido por Giese (2019) neste mesmo solo.
- 7) Quanto aos ensaios triaxiais CID dos testemunhos extraídos dos PE-II, PE-VI e da areia de Osório/RS moldados foram obtidas as seguintes considerações:
- a) Em campo, a areia de Osório/RS apresentou um grau de compactação característico de fofo a medianamente compacto e que após realização de ensaios triaxiais para tensões confinantes supracitadas se constatou que o solo apresentou comportamento aproximadamente dúctil (ver a Figura 177 e Figura 181) com parâmetros de resistência de $c' = 0$ e φ' de 30° a $35,7^\circ$, conforme Figura 179 e Figura 183;
- b) Considerando os dados de Festugato (2008) e da Corte (2016) foi possível desenvolver uma relação gráfica entre o φ ($^\circ$) e a D_r (%) para auxiliar na estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia de Osório como mostrada na Figura 184, como também comparar com os dados obtidos com o presente estudo;
- c) Quanto a camada melhorada, ao ensaiar os testemunhos se constatou que o material apresentou comportamento dilatante e ruptura frágil típico de materiais densos e/ou

- artificialmente cimentados. O solo melhorado perdeu rigidez devido a quebra de cimentação com tensões confinantes de 20 kPa, conforme apresentado na Figura 186 e Figura 190 ;
- d) Os parâmetros de resistência do solo melhorado se enquadraram, quanto c' , entre 13 kPa e 25 kPa e o φ' entre 54° e 57° . Esses valores não condizem com os parâmetros obtidos por Rossi (2019), contudo as tensões confinantes adotadas pela autora foram de 100% a 200% (aproximadamente) superior ao do presente estudo. A heterogeneidade da mistura possibilitou uma parcial cimentação da mistura e mudança da curva granulométrica, que por sua vez acarretou o aumento do valor de φ' .
- 8) Em relação a avaliação das amostras indeformadas da areia de Osório compactada, foi possível considerar:
- a) Ao longo dos primeiros 30 cm a 45 cm referentes às PE-III e PE-IV os valores dos índices de vazios estiveram entre 0,78 e 0,82 e entre 0,73 e 0,77, respectivamente. Estes valores de índices de vazios correspondem a valores de D_R entre 30,00% a 44,55% (fofo a medianamente compacto) na PE-III e 38,81% a 56,83% (medianamente compacto) na PE-IV, conforme Lambe e Withmann (1969) e Pinto (2006);
- b) Na superfície foi notado que o material arenoso esteve em condições fofas ou próximas de fofa justificado pelos processos erosivos e desestruração causados pelas chuvas intensas, contudo ao transpor os trechos superficiais notou-se um aumento de D_r (%).
- 9) Em relação a avaliação das amostras indeformadas da argila compactada abaixo da coluna granular, foi possível considerar:
- a) Os teores de umidade da argila encontraram-se numa faixa aproximada de 23% a 27%, possibilitando valores de γ_d próximos do nível ótimo para energia proctor normal, na faixa de 14,23kN/m³ a 15,78 kN/m³, como é possível visualizar na Figura 196;
- b) Percebe-se que os valores γ_d dos estudos de Rizzon (2016) e Giese (2019) foram menores comparados aos do estudo presente, sendo possível concluir que efetuar procedimentos de compactação dinâmica em períodos chuvosos afetam a eficiência da compactação do solo, devido ao aumento do teor de umidade. Portanto, inicialmente, sugere-se realizar estudos de compactação Proctor em laboratório no solo a ser melhorado, gerar as curvas de compactação em diferentes energias e pouco antes de executar a compactação dinâmica em campo, coletar amostras dos solos para obtenção dos teores de umidade, para assim verificar se o teor está enquadrado próximo ao nível ótimo.

- 10) Em relação as simulações numéricas e o método teórico de Terzaghi (1943):
- a) Nas simulações numéricas, a utilização do modelo elástico perfeitamente plástico com superfície de plastificação *Mohr-Coulomb* a partir dos parâmetros calibrados obtidos pelos resultados dos ensaios triaxiais CID do solo laterítico compactado (Giese, 2019), do solo laterítico natural (Carretta, 2018), da areia de Osório/RS e da camada melhorada do presente estudo demonstraram ser viáveis para previsão do comportamento elastoplástico do solo melhorado pela substituição dinâmica com e sem camada melhorada, tomando como base a semelhança no comportamento das curvas P vs δ_{DV} do solo obtidos pelo ensaio de placa e dos dos modos de falha;
 - b) As simulações numéricas reproduziram de forma a satisfatória o comportamento elastoplástico do solo até próximo do limite de ruptura de δ_{DV}/D_{pl} , na presença das colunas granulares com presença de camadas melhoradas (PE-I, PE-II, PE-V e PE-VI). No caso das colunas granulares sem camadas melhoradas (PE-III e PE-IV), o critério de ruptura de 25 mm (Terzaghi e Peck, 1967) foi o limite mais adequado;
 - c) As simulações numéricas apresentaram alguns fenômenos que podem ter justificado respostas obtidas em campo no decorrer dos testes, tais como: As regiões plastificadas e das concentrações de tensões cisalhantes na camada se compatibilizam às rupturas em tronco de cone obtidas; a plastificação na base da camada melhorada flexível está vinculada aos esforços de tração por flexão sofrida pela mesma durante o carregamento; a ausência de expansão volumétrica da camada pela baixa dilatância; a cunha de ruptura gerada nos pontos sem camada melhorada está compatível com o estado de compactidade da areia (mediamente compacta) e com a trinca formada na Figura 172b;
 - d) Ao comparar a curva obtida pelo método teórico de Terzaghi (1943) com as respostas de capacidade de carga da coluna granular (ver a Figura 208) em função da perda de linearidade do comportamento P vs δ_{DV}/D_{pl} se observou que os valores praticamente coincidem. Desta forma, é possível considerar que o método teórico de Terzaghi (1943) pode ser uma alternativa viável de estimativa de capacidade resistente do solo granular, desde que a relação entre o D_{pl}/D_f e a rigidez seja baixa o suficiente para que a cunha plástica ocorra na região da coluna granular.

- 11) Quanto à sonda inclinométrica experimental UFRGS pode-se informar que:
- a) Foi possível concluir que é possível desenvolver uma sonda de medição de deslocamento horizontal de baixo custo comparado às sondas comerciais e com tecnologia simples e acessíveis, como sensores *MEMS* precisos, placas microprocessadoras e leitura das medições por meio de um algoritmo programado em *Python*;
 - b) Ao comparar os gráficos da Figura 214 e Figura 215 nota-se uma perfeita compatibilização no eixo X entre curvas de deslocamento da sonda comercial e a sonda inclinométrica;
 - c) As leituras das sondas inclinométricas apresentaram valores diferentes no eixo Y, contudo foi informado pelo técnico que poderia ter ocorrido inconsistências nas leituras do sensor da sonda comercial devido a ocorrências de problemas anteriores na sonda;
 - d) Embora exista uma consagração de calibração de inclinômetro através de mesa de seno, equipamento com garra ou também por trabalhos expostos como pela rampa de calibração (PENZ,2013) ou através do procedimento proposto por De Souza *et al.* (2016), a calibração da sonda realizada através de medidas tridimensionais aqui mencionada revelou ser uma alternativa aplicável e precisa;
 - e) Mesmo com o sensor *MEMS* S2 em funcionamento se constatou a presença de leituras ruidosas em faixas extensas durante a fase de calibração na direção perpendicular à principal. A saída analógica do S2 foi utilizada a partir da conversão da saída analógica por meio de um conversor analógico/digital por conta de danos ocorridos na fase de montagem, os quais provavelmente afetaram a precisão e a confiabilidade do sensor.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora bastante difundido mundo a fora ao longo dos anos, como mencionado na introdução deste trabalho, o método da substituição dinâmica é utilizado de forma pragmática e empírica na área de melhoramento de solos por muitas empresas. Ainda hoje, existem poucos trabalhos dispostos na literatura geotécnica, sendo que muitas questões ainda necessitam de respostas e investigações para melhor compreensão da técnica. Baseado nisto, em função de questionamentos e dificuldades encontrados no decorrer desta pesquisa foram sugeridas algumas possíveis futuras investigações, sendo elas:

- a) Estudar o método da substituição dinâmica com uso de materiais de preenchimento sustentáveis (resíduos de demolição, rejeitos de mineração, etc.) ou materiais consagrados (i.e. brita graduada, solo-brita, etc.) em solos tropicais e subtropicais nacionais;
- b) Estudo o método da substituição dinâmica com materiais de preenchimento álcali-ativados;
- c) Investigar o uso do método da substituição dinâmica na estabilização de taludes naturais ou artificiais de regiões tropicais;
- d) Estudar o comportamento das colunas DR submetidas a carregamentos cíclicos;
- e) Desenvolver modelos preditivos de comportamento das colunas DR através de ferramentas numéricas (métodos dos elementos finitos, método do ponto material, método dos elementos discretos etc.) e modelos constitutivos mais complexos;
- f) Investigar o fenômeno de quebra de grãos durante a compactação dinâmica com uso de microscopia e métodos dos elementos discretos (MED);
- g) Estudar o efeito de grupo das colunas DR através de ensaios de campo e modelos numéricos.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDIZADEH, D., PAKBAZ, M. S. and NADI, B. Numeral modelling of lateral dynamic compaction on the slope in dry sand. **KSCE Journal of Civil Engineering**, nº 25, 2020, pp. 398-403

ADAFRUIT. Introducing the Raspberry Pi Zero, Disponível em: <<https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introducing-the-raspberry-pi-zero.pdf>>, 2019, Acesso em: 09 de Julho de 2019.

ADAM, D. and BRANDL, H.. Innovative dynamic compaction techniques & integrated compaction control methods. **Proceedings, 17th International, Conference on soil mechanics and geotechnical engineering**, IOS Press, 2009, pp.2216 – 2219.

AMERICAM CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Report on Soil Cement**. ACI 230,1R-09, Michigan, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Oils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements**, ASTM- D1196/D1196M-12, Pennsylvania, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. ASTM E-23, Pennsylvania, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. ASTM E-18, Pennsylvania, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures**. ASTM D599 - 3, Pennsylvania, 2003.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Design of Below-the-Hook Lifting Devices**, ASME BTH -1, New York, 2008.

ARSLAN, H., BAYKAL, G. and ERTAS, O.. Influence of tamper weight shape on dynamic compaction. **Ground Improvement**, Ice Publishing, vol, 11, nº, 2, 2007, pp. 61-66.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM ISO 6508-1. **Materiais metálicos – Escala de dureza Rockwell – Parte I: Método de ensaio (escalas: A, B, C, D, F, G, H, K, N, T)**, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 87. **Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química**, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR MB 347. **Estaca -Prova de carga estática**, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6122. **Projeto e execução de fundações**, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6484. **Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6489. **Prova de carga estática em fundação direta**, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6892. **Materiais metálicos – Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9653. **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento**, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13545. **Movimentação de cargas — Manilhas**, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15637-1. **Cintas têxteis para elevação de cargas, Parte 1: Cintas planas manufaturadas, com fitas tecidas com fios sintéticos de alta tenacidade formados por multifilamentos**, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15637-1. **Cintas têxteis para elevação de cargas, Parte 1: Cintas planas manufaturadas, com fitas tecidas com fios sintéticos de alta tenacidade formados por multifilamentos**, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15637-2. **Cintas têxteis para elevação de cargas Parte 2: Cintas tubulares manufaturadas, com cordões de fios sintéticos de alta tenacidade formados por multifilamento**, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16697. **Cimento Portland – Requisitos**, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16840. **Determinação de índice de vazios máximo para solos não-coesivos**, Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16843. **Determinação de índice de vazios mínimo para solos não-coesivos**, Rio de Janeiro, 2020.

ATKINSON, J. H.. **An introduction to the mechanics of soils and foundations: through critical state soil mechanics**, London: MPEraw-Hill, 1993, 337p.

ATKINSON, J. H. and BRANSBY, P. L.. **The mechanics of soils: An introduction critical state soil mechanics**, London: MPEraw-Hill, 1978, 375p.

ATTEWELL P. B. and FARMER, I. W.. Attenuation of ground vibrations from pile driving, **Ground Engineering** v, 3, nº 7, 1973, pp.26-29.

BACCI, D. LA C., LANDIM, P. M. B., ESTON, S. M. and IRAMINA, W. S., Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas – Parte I, Scielo, **Revista Escola de Minas**, vol, 56, n°, 1, 2013, pp.51-57.

BARATA, F. E: **Propriedades Mecânicas dos Solos**. Rio de Janeiro: LTC. 1984.

BARTHOLOMEW, C. L., MURRAY, B. C. and GOINS, D. L.. **Embankment instrumentation manual**, Washington, DC: Bureau of Reclamation, 1987.

BO, M. W., NA, Y. M., ARULRAJAH, A. and CHANG, M. F..Densification of granular soil by dynamic compaction, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, ICE Library, **Ground Improvement**, vol, 162, n°, GI3, 2013, pp. 121- 132.

CARBÓ, H M.. **.Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. Disponível em: <<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>>, 2008, Acesso em: 07 de Julho de 2019.

CARRETTA, M. S.. **Comportamento de um solo residual levemente cimentado: Estimativa de capacidade de carga para estacas submetidas a esforços transversais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018, 180p.

CASAGRANDE, M. D. T.. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando uso como base de fundações superficiais**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001, 94p.

CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. A Low-cost method of assessing clay dessication fot Low- rise buildings. **Proc. Of the Institute Civil Engineering**, vol. 92, n° 2, 1992, pp. 82-89.

CHAUMENY, J. L., HECHT, T., KIRSTEIN, J., KRINGS, M. and LUTZ, B,.. Dynamic consolidation for the intersection of an active sinkhole area in the Course of the Federal Highway BAB A 71, **4th Hanz Lorenz Symposium**, Berlim, 2008.

CHEN, W. F. and HAN, D. J.. **Plasticity for structural engineers**, New York: Springer – Verlag, 1988.

CHEN, W. F. and ZHANG, H.. **Structural plasticity: theory, problems and CAE Software**, New York: Springer – Verlag, 1991.

CHOW, Y. K., WONG, K. Y., KARUNARATNE, G. P. and LEE, S. L..Wave equation analysis of piles - A rational theoretical approach,**Proceedings,3rd Int, Conf, Application of Stress – Wave Theory on Piles**, Canadian Geotechnical Society, 1988, pp. 208 – 218.

CHOW, Y. K., YONG, D. M., YONG, K. Y. and LEE, S. L.. Monitoring of dynamic compaction by deceleration measurements, Elsevier, **Computers and Geotechnics**, vol, 10, s/n°, 1990, pp.189- 209.

CHOW, Y. K., YONG, D. M., YONG, K. Y. and LEE, S. L.. Dynamic compaction analysis, ASCE Library, **Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 118, n° 8, 1992, pp. 1141 – 1157.

CHOW, Y. K., YONG, D. M., YONG, K. Y. and LEE, S.. Dynamic compaction of loose granular soils: Effect of print spacing, ASCE Library, **Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 120, n° 7, 1994, pp. 1115 – 1133.

CHU, J., VARAKSIN, S., KLOTZ, U. and MENGÉ, P., State of the Art Report: Construction Processes, **17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering: TC17 meeting ground improvement**, 2009, 130p.

CLOUGHT, W., SITAR, N., BACHUS, R. C. and RAD, N. S.. Cemented sands under static loading, ASCE, **Journal Geotechnical Enging Division**, vol. 107, n° 6, 1981, pp.799-817.

CONSOLI, N. C.. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils, **Engineering Geology**, vol. 169, S/n°, 2014, pp. 61-68.

CONSOLI, N. C., CASAGRANDE, M. D. T., THOMÉ, A., DALLA ROSA, F. and FAHEY, M.. Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand, **Geotechnique**, vol. 59, n° 5, 2009c, pp. 471-476.

CONSOLI, N. C., CRUZ, R. C., FLOSS, M. F. and FESTUGATO, L.. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand, **Journal Geotechnical and Geovironmental Engineering**, vol. 136, s/n°, 2010, pp. 759-763.

CONSOLI, N. C., CRUZ, R. C., FONSECA, A. V. and COOP, M. R.. Influence of cement-voids ratio on stress-dilatancy behavior of artificially cemented sand, **Journal Geotechnical and Geovironmental Engineering**, vol. 138, s/n°, 2012a, pp. 100-109.

CONSOLI, N. C. and FARO, V. P.. Estudo numérico de fundações superficiais sobre sistema de dupla camada, **IMED**, vol. 1, n° 1, 2014, pp. 18-28.

CONSOLI, N. C., FESTUGATO, L. and HEINECK, K. S.. Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry, **Geosynthetics International**, vol. 16, n° 9, 2009b, pp. 109-115.

CONSOLI, N. C., FESTUGATO, L., ROCHA, C. G., CRUZ, R. C.. Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: Influence of types of Portland cement, **Construction and buildings material**, vol. 49, S/n°, 2013, pp. 591-597.

CONSOLI, N. C., FONSECA, A. V., CRUZ, R. C. and HEINECK, K. S.. Fundamental Parameters for the stiffness and strength of artificially cemented sand, **Geotechnique**, vol. 135, n° 9, 2009d, pp. 1347-1353.

CONSOLI, N. C., FONSECA, A. V., SILVA, S. R., CRUZ, R. C. and FONINI, A.. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils, **Geotechnique**, vol. 62, n° 2, 2012b, pp. 177-183.

CONSOLI, N. C., FOPPA, D., FESTUGATO, L. and HEINECK, K. S.. Key parameters for strenght control of artificially cemented soils, **Journal Geotechnical and Geovironmental**

andEngineering, vol. 133, s/nº, 2007, pp. 197-205.

CONSOLI, N. C., ROSA, D. A., CRUZ, R. C. and DALLA ROSA, A.. Water content, porosity and cement content as parameter controlling strength of artificially cemented silty soil, **Engineering Geology**, vol. 122, s/nº, 2011, pp. 328-333.

CONSOLI, N., C., ROSSI, J. G.; FESTUGATO, L., RUVER, C. A., SCHEUERMANN FILHO, H., FOPPA, D., CARRETTA, M. da S. and BATISTA, H. L. Circular-Plate Load Tests on Bounded Cemented Layers above Weak Cohesive-Frictional Soil, **Journal Geotechnical and Geovironmental Engineering**, vol. 145, nº 10, 2019, pp. 1-8.

CONSOLI, N. C., SCHNAID, F. and MILITITSKY, J., Interpretation of plate load tests on residual soil site, **Journal Geotechnical and Geovironmental Engineering**, vol. 124, nº 9, 1998, pp. 857-867.

CONSOLI, N. C., VENDRUSCOLO, M. A., FONINI, A. and DALLA ROSA, F.. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range, **Geotextilesand Geomembranes**, vol. 27, s/nº, 2009a, pp. 196-203.

COVASSI, P. A., KUNZ R., NADAL, D., BOSSIO, C. and COVASSI, M. E.. Vigas clinométricas: Tecnologia y aplicaciones, **Proceedings, 24th Congreso Argentino de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica – Salta/Argentina**, s/nº, 2018, pp.1-18,

CPRM. Mapa Geológico do estado do Rio Grande do Sul, Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf>, 2019, Acesso em: 20 de Março de 2019.

CRAIG, R. F.. **Craig, mecânica dos solos (traduzido)**, Rio de Janeiro: LTC, 2012, 365p.

CRESWELL, J. W.. **Projeto de pesquisa – Método qualitativo, quantitativo e misto**, Porto Alegre: SAGE, 2010, 296p.

CORTE, M. B.. **Compactação dinâmica em solo coesivo friccional**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016, 180p.

CRUZ, C. R.. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018, 216p.

CUDMANI, R. O.. **Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes solos parcialmente saturados através de ensaios de placa**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994, 150p.

DALLA ROSA, F. C.. **Caracterização Geotécnica e Estudo do Comportamento Carga x Recalque do Solo do Campo Experimental de Geotecnia da UPF**, Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade de Passo Fundo, 2004.

DALLA ROSA, F. C.. **Efeito do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009, 191p.

DALLA ROSA, F. E., RUVER, C. A. and THOMÉ, A.. Obtenção das características de resistência e deformabilidade de um solo residual de Basalto através de Ensaio de Placa, XXXI Jornadas Sud- Americanas Ingeniería Estructural, In: **Anais do...** CD Rom, 1994, p, 1 – 12.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 198. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 412. **Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2019.

DE SOUZA, H. G., EHRLICH, M., DIEGUEZ, C. A. and SALVIANO, A. L. S.. Aferição da Performance de Sondas Inclinométricas Através de Sistema de Calibração e Resultados de Campo, In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 18, 2016, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: Minas Centro, 2016.

DIMOV, L. A.. Some results of horizontal and vertical plate-bearing tests of soils, Plenum Publishing, **Soil mechanics and foundation engineering**, vol. 30, n° 4, 1993, pp. 158 – 161.

DU, J., WU, S., HOU, S., and WEI, Y.. Deformation Analysis of Granular Soils under Dynamic Compaction Based on Stochastic Medium Theory. **Mathematical Problems in Engineering**, Hidawi, s/vol., s/n°, 2019, pp. 1-10.

DONATO, M.. **Ensaio triaxiais do solo do campo experimental do CETEC/ FAER/ UPF**, Resultados realizados e fornecidos por meio digital pelo autor sem autor, 2005,

DUMAS, J. Y., BEATON, N. F. and MOREL, J. F.. Dynamic Compaction using select fill displacement methods. **International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, 36, 1993.

DUNICLIFF, J.. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Lexington, Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc, 1988, 577p.

EBERHARDT, E. and STEAD, D.. **Geotechnical Instrumentation**, In: DARLING, P.. Mining engineering handbook 3° edition, USA: SME, Inc, 2011, 1984p.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos. - 2, ed.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

ENCARDIORITY. Sistema inclinômetro. Disponível em: <http://www.commetro.com.br/files_index/documentos/inclinometro/EAN-26M.pdf>, 2016, Acesso em: 12 de Abril de 2019,

ENGINEERING AND TECHNOLOGY HISTORY WIKI (ETHW), MEMS. Disponível em: <<https://ethw.org/MEMS>> Acesso em: 12 de Abril de 2019.

FAHMY, M. A. M.. **A study of soil-cement stabilization of heavy clays with a particular reference to London Clay**. Thesis (Doctor of Philosophy), University of London, 1954, 180p.

FARO, V. P.. **Carregamento lateral em fundações profundas associadas a solos tratados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014,349p.

FEI, X. Z., WANG, Z., ZHOU, Z. B., GAO, L. Y. and HE, L. H.. Model Test of improvement Depth of Dynamic Compaction, ESE, **Journal of Sichuan University**, vol. 34, n°4, 2002, pp. 56 -59.

FENG, S. J., SHUI, W. H., TAN, K., GAO, L. Y. and HE, L. H.. Field Evaluation of Dynamic Compaction on granular deposits, ASCE, **Journal of performance of constructed facilities**, vol. 25, n° 3, 2011, pp. 241-249.

FERNANDES, M. de M.. **Mecânica dos solos – Introdução à Engenharia Geotécnica (Volume 2)**, Porto: FEUP, 2011, 592p.

FESTUGATO, L.. **Análise do comportamento mecânico de um solo microreforçado com fibras de distintos índices aspecto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, 144p.

FOPPA, D.. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005, 144p.

FORMOSO, M.T.. **Desenvolvimento de um inclinômetro para monitorar o comportamento de taludes instáveis**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, 114p.

FLOSS, M. F.. **Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012, 183p.

FORCELLINI, M., GARBIN, G. R., FARO, V.P. and CONSOLI, N. C.. Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand, **Advances in Transportation Geotechnic**, vol 143,s/n°, 2016, pp. 75-81.

FREDLUND, D.G., XING, A.. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 31, n° 4, 1994, pp.521-532.

GAMBIN, M.P..The Menard Dynamic Consolidation at Nice Airport. **8 th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 1983.

GAMBIN, M. P.. Le Compactage Profond Des Sables, Idées Des Base, **In: 3rd International Conference on Ground Improvement Geosystems: Densification and Reinforcement**, s/vol., s/n°, 1997, pp. 1-27.

GERHARDT, T. E. and SILVERA, D. T.. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: UFRGS, 2009, 120p.

GEOKON. Digital Inclinometer: Spiral indicator system (MEMS), Disponível em: <<https://www.geokon.com/GK-604D>>, 2019, Acesso em: 12 de Abril de 2019.

GEODAQ. Inclínometer, Disponível em: <<http://www.geodaq.com/inclinometer.html/>>, 2014, Acesso em: 16 de Abril de 2019.

GEOSIG. Seismometer, Disponível em: < <https://www.geosig.com/Seismometers-ct1747.aspx>>, 2020a, Acesso em: 08 de Dezembro de 2020.

GEOSIG. GMS Plus6, Disponível em: < <https://www.geosig.com/GMSplus---GMSplus6-id12557.aspx>>, 2020b, Acesso em: 08 de Dezembro de 2020.

GHANBARI, E. and HAMIDI, A.. Improvement parameters in dynamic compaction to the slopes, Science Direct, **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, vol. 7, n° 2, 2015, pp. 233 – 236.

GHASSEMI, A., PAK, A. and SHAHIR, H.. Validity of Menard Relation in dynamic compaction operations, **Proceedings of the institution of civil engineers**, vol. 162, GII, 2009, pp. 37- 45.

GIESE, D. N.. **Compactação dinâmica em solo coesivo friccional**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019, 180p.

GIL, A. C.. **Como elaborar um projeto de pesquisa- 4ª, ed**, São Paulo: Atlas, 2002, 176p.

GIRARDELLO, V., MENEGHETTI, L. R. R., BERTE, V. S., PINTO, P. C., KORF, P. E. E THOME, A.. Comparação das técnicas de atenuação natural, bioaumentação e bioventing para avaliar biodegradação de um solo contaminado com biodiesel, **Congresso Regional de Iniciação Científica**,22,2007, Passo Fundo, **Anais...** Passo Fundo: UPF, 2007.

GREEN, G. E. and MIKKELSEN, P.E.. Deformation measurements with inclinometers, TRR 1169. **Transportation Research Board**, Washington, 1988, pp. 1–15.

GU, Q. and LEE, F. H.. **Ground response to dynamic compaction of dry sand**, *Geotechnique*, Vol.52, No,7, 2002, pp. 481–493.

HAIJALILUE-BONAB, M. and ZARE, F. S.. Investigation on tamping spacing in dynamic compaction using model tests. ICE Publishing, **Ground Improvement**, vol.167,GI3,2014, pp.219 – 231.

HALDAR, S. K.. **Mineral exploration: Principles and applications (2º edition)**. Amsterdã: Elsevier, 2018, 378p.

HALLQUIST, J. O.. **User’s manual for DYNA2D- An explicit two dimensional go hydrodynamic finite element code with interactive rezoning and graphical display**. UCRL-MA-105413, Rev,2, Lawrence Livermore National Laboratory,1988.

HAMIDI, B.. **Distinguished Ground Improvement Projects by dynamic compaction of dynamic replacement**. Thesis (Doctoral in Civil Engineer), Curtin University, 2014, 583p.

HAMIDI, B., NIKRAZ, H., YEE, K., VARASKIN, S. and WONG, T. L.. Ground Improvement in Deep Waters Using Dynamic Replacement. **International Offshore and Polar Engineering Conference**, Beijing, China, 2010b, pp. 848– 853.

HAMIDI, B., NIKRAZ, H. and VARASKIN, S.. Dynamic replacement constructing embankments and walls of soft soil, **3rdInternational Conference on problematic soils**, Adelaide, Australia, 2010a, pp. 105– 111.

HAMIDI, B., NIKRAZ, H. and VARASKIN, S.. Advances in dynamic compaction, **International Conference on Advances in Geotechnical Engineering**, Perth, Australia, 2011a, pp. 433 –436.

HAMIDI, B., NIKRAZ, H. and VARASKIN, S.. Dynamic compaction vibration monitoring in saturated site, **International Conference on Advances in Geotechnical Engineering**, Perth, Australia, 2011b, pp. 267 – 272.

HAN, J. Ground modification by a combination of dynamic compaction, consolidation, and replacement, **International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, New York, EUA, 1998, pp. 341-346.

HANNA, T. H.. **Field instrumentation in Geotechnical Engineering (first edition)**, Trans Tech Publications: Germany, 1985, 843p.

HANSEN, B. J.. **A General formular for bearing capacity**. The Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bulletin n° 11,1961, 10p.

HARISH, C., GUPTA, M. S. N., RADHIKA, K. N. and ITAGI, M.. Effect of Sand column with and without encasement of Geosynthetics in Black cotton soil, **International Research Journal of Engineering and Technology**, Vol. 3, n° 7, 2016, pp.2064-2071.

HEAD, K. H.. **Manual of soil laboratory testing: effective stress tests (volume 3) – 2° edition**. New York: John Wiley and sons, 1998, 425p.

HEINECK, K. S., COOP, M. R. and CONSOLI, N. C.. Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains. **Journal Geotechnical and Geoenvironmental and Engineering**, vol. 131, n° 8, 2005, pp. 1024-1033.

HOLEYMAN, A.. Unidimensional modelization of dynamics footing behavior, **Proc, 11th Int, Conf. Soil Mech. Found. Engng**, San Francisco, vol. 2, 1985, pp.761–764.

HOLEYMAN, A. and VANNESTE, G.. **A New Approach to the Execution and Control of Dynamic Compaction**, Compaction Technology, Thomas Telford, London, 1988, pp. 111-124p.

HOMAN, M. H.. **Monitoring and evaluation of dynamic compaction for Gilcrease Expressway, Tulsa, Oklahoma**. Dissertation (Master in Civil Engineer), University Arkansas, 1985, 118p.

HUGHES, J. M. and WITHERS, N. J.. Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns, **Ground Engineering**, vol. 47, n° 3 (May), 1974, pp. 42-49.

HUNT, R. E.. **Geotechnical Engineering Investigation Handbook - 2° edition**, London: Taylor & Francis, 2005, 1066p.

HWANG, J, H, and TU, T. Y.. Ground vibration due to dynamic compaction, Elsevier, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 26, s/n°6, 2006, pp. 337-346.

INDRATINA, B., CHU, J. and RUJIKIATKAMJORN, C.. **Ground improvement case histories, compaction, grouting, and geosynthetics**, BH Elsevier: Oxford, 2015, 796p.

INGLES, O, G, and METCALF, J, B.. **Soil stabilization principles and practice**, Melbourne Butter works, 1972, 374p.

JESSBURGER, H. and BEINE, R.. Heavy Tamping: Theoretical and Practical, Aspects. **Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol. 3, s/n°, 1981, pp.695 -699.

JIA, M., YANG, Y., LIU, B, and WU, S.. PFC/FLAC coupled simulation of dynamic compaction in granular soils, **Granular matter**, Springer, vol.20, n°4, 2018, pp. 1-15.

LAMBE, W. T. and WITHMAN, R. V.. **Soil Mechanics**, New York: John Wiley & sons, 1969.

LAY, T.. **Modern Global Seismology**, International Geophysics, Amsterdã: Elsevier, 1995,521p.

LAV, M. A., ERCAN, Y. and KARADOĞAN, F..(2010) Vibrations due to Dynamic Compaction, **15th International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**, San Diego, California, 2010, pp. 1-11.

LEE, K. L. and SEED, H. B.. Drained strength characteristics of Sands, **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, vol. 93, n°SME, 1967, pp. 117-141.

LEE, S. L., CHOW, Y. K., KARUNARATNE, G. P. and WONG, K. Y... Rational wave equation model for pile driving analysis. **Journal Geotechnical Engineering**, ASCE, vol. 114, n°, 3, 1988, pp. 306-325.

LEE, F. H. and GU, Q. Method for Estimating Dynamic Compaction Effect on Sand, **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Enging**, ASCE, vol. 130, n°, 2, 2004, pp. 139 –152.

LEONARDS, G. A., HOTZ, R. D. and CUTTER, W. A.. Dynamic compaction of granular soils. **Journal of the Geotechnical, Engineering**, ASCE, vol. 116, n°, 3, 1980, pp. 514-527.

LEONG, E. C., HE, L., RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 25, n° 3, 2002, pp. 322-333.

LOBO, T. M. V. De M.. **Contribuição para o estudo da técnica de compactação dinâmica de solos**. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil), Universidade Nova de Lisboa, 2017, 86p.

LOPES, F. R. e VELLOSO D. A.. **Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo e fundações superficiais – volume único**, São Paulo: Oficina de textos, 2012.

LOPES, I. I.. O estudo das ondas sísmicas superficiais como método de caracterização dinâmica de solos, **VI Congresso Nacional de Geologia**, S/vol., S/n°, 2003, pp. 38-41.

LOSS, R.. Comparative Studies for Compacting Cohesionless Soils. **Proceedings, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol. III, s/nº, 1936, pp. 174-178.

LUKAS, R. G.. Densification of loose deposits by pouding. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Vol. 10, nº 74, 1980, pp. 435 – 446.

LUKAS, R. G.. **Geotechnical Engineering Circular No. 1: Dynamic Compaction**. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, 1995.

LUONGO, V.. Dynamic compaction: predicting depth of improvement. **In: Grouting Soil Improvement and Geosynthetics: ASCE Geotechnical Special Publication**, vol. 30, nº 2, New Orleans, 1992, pp. 927-939.

LUPIEZOWIEC, M. and KANTY, P.. Analysis of Dynamic Replacement Column construction Process on Neighbouring Engineering Structures. **In: Archives of Civil Engineering: De Gruyter**, vol. 61, nº 3, 2015, pp. 3-18.

KAWALEC, J. and WARCHAL, T.. Dynamic replacement columns with aggregate transition zone stabilized by geosynthetics for embankment foundation over weak deposits, ICE Publishing: **Proceedings of the XVI European Congress Soil Mechanics Geotechnical Engineering**, 2015, pp. 1511-1516.

KÉDZI, A.. **Stabilized earth roads**. Elsevier Scientific Publishing: Amsterdam, 1979, 328p.

KOPF, F., PAULMICH, I, and ADAM, D.. Modelling and simulation of heavy tamping dynamic response of the ground, **14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering**, Bratislava, Slovak Republic, 2010.

KOOSHARI, H., ALIEHALI, H., NAJAFI, A., and ADAMPIRA, M.. Evaluation of factors the estimated improvement depth of dynamic compaction using fuzzy method and PSO, Elsevier, **Soil and Foundations**, s/vol., s/ nº, 2016, pp. 1 -16,

KRELLING, P. C. L.. **Concepção de um inclinômetro foto-mecânico para controle geodésico de estruturas**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, 2006, 128p.

LAUZON, M., MOREL, J. F., BRIET, S. and BEATON, N. F.. Ground vibrations induced by dynamic compaction and rapid impact compaction. **Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, s/vol., s/nº, 2011, pp. 1-8.

MACHAN, G. and BENNETT, V. G.. **Transportation Research Circular E-C129: Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects - State of practice**, Washington, DC: Transportation research Board, 2008.

MADHAV, M.R. and VITKAR, P. P.. Strip Footings on weak clay stabilized with a Granular trench or Pile, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.15, nº 4, 1978, pp. 605-609.

MARQUES, S. F. V.. CONSOLI, N. C. and SOUSA, J. A.. Testing Cement Improved Residual Soil Layers, **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol 26, s/n°, 2014, pp.544-550.

MARR, W. A.. **A History of progress: Selected U, S papers in Geotechnical Engineering – n° 118**, ASCE, Virginia, 2003.

MASSAD, F.. **Mecânica dos solos experimental**, Oficina de textos: São Paulo, 2016, 287p.

MAYNE, P. W., and JONES, J. S.. Impact stresses during dynamic compaction, **Journal of the Geotechnical Engineering**, vol. 104, n°, 10, 1983, pp. 1342-1346.

MAYNE, P. W., JONES, J. S. and DUMAS, J. Y.. Ground Response to Dynamic consolidation. **Journal of the Geotechnical Engineering**, s/vol. n°, 110, 1984, pp. 757-774.

MAYNE, P. W.. Ground Vibrations during dynamic compaction. **Symposium on Vibration Problems in Geotechnical Engineering**, ASCE Special Publication, Detroit, 1985 pp. 247-265.

MEHDIPOUR, S. and HAMIDI, A.. Impact of tamper shape on the efficiency and vibrations induced during dynamic compaction of dry sands by 3D finite element modelling, **Civil Engineering Infrastructures Journal**, Vol. 50, n° 1, 2017, pp. 151- 163.

MENARD, L. and BROISE, Y.. Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation, ICE Virtual Library, **Geotechnique**, vol. 25, no, 1, 1975, pp. 3-17.

MENARD GROUP (2021) Dynamic Compaction. Disponível em: <<https://menardcanada.ca/ground-improvement-solutions/dynamic-compaction/>> Acesso em: 27 de Agosto de 2021.

MEYERHOF, R. and HANNA, A. M.. Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load, **Canadian Geotechnical Journal**, n° 15, 1978, p, 565-572.

MIAO, L., CHEN, G. and HONG, Z.. Application of dynamic compaction in highway: a case study, Springer, **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 24, S/n°, 1, 2006, pp. 91-99.

MICHALOWSKI, R. L. and NADUKURU, S. S.. Static Fatigue, Time Effects, and Delayed increase in penetration resistance after dynamic compaction of sands. **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 138, No 5, 2012, pp. 564 -574.

MICHELIN, A., KATCHADOURIAN, A., DURGUNOGLU, H. T. and AKCALIKAL, O.. A case study on soil improvement with dynamic compaction and dynamic replacement. **Proceeding of the XVI European Conference Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of the Geotechnical, Engineering**, ICE, s/vol. s/ n°, 2015, pp. 1463-1468.

MIKKELSEN, P. E.. Cement–bentonite grout backfill for borehole instruments. **Geotechnical News**, vol. 20, n°4, 2002, pp. 38–42.

MIKKELSEN, P. E.. Advances in inclinometer data analysis. **Proceedings, Symposium on field measurements in geomechanics**, s/vol., s/n°, Oslo, 2003, pp.1 -13.

MILLER, G. F.. and PURSEY, H.. On the partition of energy between Elastic Waves in a semi infinite Solid, **Proceedings the Royal of Society**, vol. 233, s/nº, 1955, pp. 55-69,.

MITCHELL, J, K.. Soil Improvement: State-of-the-Art Report, **Proc, 10th International Conference on Soil Mechanics**, Vol. 4, Session 12, Stockholm, 1981, pp. 509-565.

MITTAL, S.. Recent Experiences of Ground Stabilization Techniques. **Proceedings National Workshop on Emerging trends in Geotechnical Engineering**, Indian Institute of technology Guwahati (IND), Indian,2012.

MOH, Z., C.. Reactions of soil minerals with cement and chemicals, **Highway Research Record**, Washington, v,198, 1965, pp. 39-56.

MOHAMMED, M. M.. HASHIM, R, and SALMAN, A, F.. Effective improvement depth for ground treated with rapid impact compaction. **Scientific Research and Essays**, vol. 5, nº 18, 2010, pp. 2686-2693.

MOSTAFA, K.. **Numerical modelling of dynamic compaction in cohesive soils**. Thesis (Doctoral of Philosophy), University Akron, 2010, 182p.

MURATA (2019) SCA103T-D04-1. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Murata-Electronics/SCA103T-D04-1?qs=%2Fha2pyFadugFw4FFoGcz6TTtSGF9dIEZhKsTDA11Wk1kMia3QBZPHg%3D%3D> Acesso em: 11 de Abril de 2019.

MULLINS, G.. GUNARATNE, M.. STINNETE.. P, AND THILAKASIRI, S..Prediction of dynamic compaction pounder penetration, **Soil and foundations**, Japanese Geotechnical Society, vol. 40, nº 5, 2000, pp. 91- 97.

NARENDRANATHAN, N,; LEE, E, C.. **Dynamic Compaction and Dynamic Consolidation of Soils**, Perth: Elsevier, 2015 , pp. 365–398, In : INDRARATNA, B.; CHU, J.; CHOLACHAT RUJIKIATKAMJORN, Ground Improvement Case Histories: Compaction, Grouting and Geosynthetics, Perth: Elsevier, 2015, 796p.

NATÁRIO, G.. Obras de melhoria e reforço de solos, **Revista Geotecnia**, S/vol., nº,139, 2017, pp. 77-98.

NIEBLE, C. M.. **Desmonte cuidados com explosivos**, São Paulo: Oficina de textos, 2017, 126p.

NICHOLLS, H. R., JOHNSON, C. F. and DUVALL, W. I. **USBM Bulletin 656 - Blasting Vibrations and Their Effects on Structures**. US Bureau of Mines, 1971, 105p.

NORDAL, S, **Course of Geodynamics**, Norwegian University of Science, Norway, 2009.

O'BRIEN, J, F, and GUPTON, C, P.. In Situ Stabilization of Two Industrial Sites by Dynamic Compaction, **1th International Conference on Case Histories in Geotechnical engineering**, Vol.29, s/nº, 1984, pp.1259 – 1264.

OSHIMA, A. and TAKADA, N.. Effect of ram momentum on compaction by heavy tamping, **Proceedings 13 th International Conference Soil mechanics foundation engineering**, India, s/vol., s/ n°. 1994, pp. 1141 -1144.

OSHIMA, A, and TAKADA, N.. Relation between compacted area and ram momentum by heavy tamping, **Proceedings 14 th International Conference Soil mechanics foundation engineering**, India, s/vol., s/ n°. 1997, pp. 1641 -1644.

PAN, J. L., SELBY, A. R.. Analysis of Dynamic Compaction of Loose Soils under impact loads, **40th International Conference on recent advances in Earthquake Engineering and Soil Dynamics**, vol. 4, s/n°, pp. 1-7.

PANTELIDIS, L.. Determining of the soil strength characteristics through the plate bearing test, ICE Virtual Library, **Foundations civil and environmental engineering**, vol. 11, s/n°, 2007, pp. 55-65.

PAL ROY, P. P.. **Rock Blasting: Effects and operations**, Balkema:Netherlands, 2005, 380 p.

PARRY, R. H. G.. Estimating foundation settlements in sand from plate bearing tests, ICE Virtual Library, **Geotechnique**, vol. 28, no, 1, 1978, pp. 107-118.

PENG, C.. The application of dynamic replacement method in deviation rectification of support pile, **3rd International Conference on Energy Materials and Environment Engineering**, n°, 61, 2017, pp. 1-6.

PENZ, S. R.. **Desenvolvimento de um inclinômetro com tecnologia MEMs aplicado ao monitoramento de obras geotécnicas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Passo Fundo, 2013, 128p.

PINTO, C. S. P.. **Curso básico de mecânica dos solos 3^aed**, Oficina de textos: São Paulo, 2006, 367p.

PORÁN, C. J. and RODRIGUEZ, J. A.. Finite element analysis of impact of behavior of sand, **Soil and foundations**, JSSMFE, vol. 32, n°, 4, 1992, pp. 68-80.

PRIETTO, P. D. M.. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, 150p.

RIPPER NETO, A. P.. **Vibrações mecânicas**. E-papers serviços editoriais: Rio de Janeiro, 2007, 498p.

RIZZON, M. M.. **Efeitos da compactação em solos residuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016, 85p.

ROBERTSON, P. K.. In situ testing and its application to foundation engineering. **Canadian Geotechnical Journal**, vol 23, s/n°, 1987, pp.573-591.

ROHLFES JUNIOR, J. A.. **Estudo do comportamento de um solo residual melhorados através de técnicas mecânicas e físico-químicas e sua aplicação à análise de fundações**

superficiais, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, 150p.

ROLLINS, K. M. and KIM, G. W.. Dynamic Compaction of Collapsible Soils Based on U.S Case Histories. **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, vol. 136, n° 9, 2010, pp. 1178 -1186.

ROLLINS, K, M, and ROGERS, G, W, Mitigation measures for small structures on collapsible alluvial soils. **Journal of the Geotechnical Engineering**, ASCE, vol. 120, n°, 9, 1994, pp. 1533 -1553.

ROSSI, J, G.. **Fundações circulares apoiadas em camadas de solo-cimento de área variável implantadas em solo coesivo friccional de baixa capacidade de suportes**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019, 142p.

ROTTA, G, V.. CONSOLI, N. C., PRIETTO, P. D. M., COOP, M. R. and GRAHAM, J.. Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress, ICE Virtual Library, **Geotechnique**, vol. 53, n° 5, 2003, pp. 493-501.

RUVER, C. A.. **Estudo do arrancamento de fundações em solos tratados com cimento**, Tese (Doutorado em Eng. Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 330p.

SACHETTI, A. S., ROJAS, J. W. J., and HEINECK, K. S.. Caracterização geotécnica dos solos de Passo Fundo e Erechim e Geológica da rocha de Passo Fundo. **Revista de Engenharia Civil da IMED**, vol.1, n° 1, 2014, pp.11 – 17.

SALAH-MARS, S.. **A multiple yield surface plasticity model for response of dry soil impact loading**. Dissertation (Master in Civil Engineer), Stanford University, 1989.

SALES, L. F.. **Estudo de comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, 128p.

SCHNAID, F., PRIETTO, P. D. M. and CONSOLI, N. C.. Characterization of cemented sandy in triaxial soils, **Journal Geotechnical and Geoenvironmental and Engineering**, vol. 127, n°10, 2001, pp. 857-868.

SCHOFIELD, A. N. and WROTH, C. P.. **A critical state soil mechanics**. London: MaPEraw-Hill, 1968.

SCOTT, R. A. and PEARCE, R. W.. **Soil Compaction by Impact Ground Treatment by Deep Compaction**, Institution of Civil Engineers, Telford Ltd.. London, 1976, pp. 19-30.

SĘKOWSKI, J., KWIECIEŃ, S. and KANTY, P.. The influence of dynamic replacement method on the adjacent Soil, **International Journal of Civil Engineering**, vol. 16, n°10, 2018, pp. 1515-1522.

SENÇO, W.. **Manual de Técnicas de Pavimentação**, 1ª, ed, São Paulo: PINI, 2001, p,670.

SENÇO, W.. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª, ed, São Paulo: PINI, 2007, p,761.

- SERRIDGE, C. J. and SYNAC, O.. Application of the Rapid Impact Compaction technique for risk mitigation in problematic soils. **10th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment**, S/Vol., Nottingham, 2006, pp.1 – 13.
- SILVA, J, P. S.. **Análise comparativa de métodos para definição do coeficiente de reação horizontal em solo coesivo friccional**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018, 140p.
- SISKIND, D. E. STAGG, M. S., KOPP, J. W. and DOWDING, C. H.. **Structure response and damage produced by ground vibrations from surface blasting**, *RI 8507*, U,S, Bureau of Mines, Washington, USA, 1989, 74p.
- SHUI, J., WANG, T. H. and WANG, Y. L.. SPT for dynamic compaction with 10000 kN,m high energy on foundation backfilled with crushed stone, **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, CNKI, vol. 28, n° 10, 2006,pp.1309-1312.
- SILVEIRA, J. F. A. Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento, São Paulo: Oficina de Textos, 2006, 416p.
- SLOCOMBE, B. C.. Dynamic compaction. **In: Ground improvement (2° edition)**. ed. Taylor and Francis, New York, 2004, pp. 20–39.
- SLOCOMBE, B. C.. Dynamic compaction. **In: Ground improvement (3° edition)**, ed. Chapman and Hall, Glasgow., 2013, pp. 57–84.
- SLOPE INDICATOR. Inclímetro. Disponível em: <<https://durhamgeo.com/product-category/geotechnical-instrumentation/geotechnical-sensors/inclinometer-systems/>>, 2019, Acesso em: 10 de Abril de 2019.
- SOUZA JUNIOR, T. F. de, JESUS, F. F. S., RUVEN, C. A., HEINECK, K. S. and LUZ, C. C.. Aplicação do método de classificação MCT ao solo coesivo friccional do município de Passo Fundo - RS, **Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul**,10, 2019, Santa Maria, **Anais..**, Santa Maria: UFSM, 2019.
- SOUZA JUNIOR, T. F. and PASQUAL, R. P. S.. New method to predict crater depth obtained in dynamic compaction. **Geotechnical and Geological Engineering**, Springer, vol. 39, s/n°, 2021, pp. 3981 -3993.
- SOLOWSKI, W., SLOAN, S. W., KANT, P. and KWLECLÉN, S.. Numerical simulation of a small-scale dynamic replacement stone column creation experiment, **3th International Conference on Particle-based Methods –Fundamentals and Application**, Stuttgart, 2013.
- SPINELLI, L. F.. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, 133p.
- STARK, T. D. and CHOI, H.. Slopes inclinometers for landslides. **Landslides**, Springer - Vergan, vol. 5, n°, 3, 2008, pp. 339 -350.

STINNETTE, P., GUNARATNE, M., MULLINS, G., THILAKASIRI, S.. A quality control program for performance evaluation of dynamic replacement of organic soil deposits. **Geotechnical Geological Engineering**, vol.15, n° 4, 1997, pp. 283-302.

STRECK, E. V., KAMPF, N., DALMOLIN, R. S. D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P. C. and SCHNEIDER, P.. **Solos do Rio Grande do Sul**, EMATER: Porto Alegre/RS,2002, 107p.

SWISSBORING, 2021, Dynamic Compaction. Disponível em: <<https://www.swissboring.com/Technologies/DynamicCompaction>> Acesso em: 27 de Agosto de 2021.

TAN, Y.. Deep Dynamic Compaction of Liquefaction-potential Granular Backfill. **4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering**, Thessaloniki: Springer, 2007.

TARAWNEH, B., NUSAIRAT, J. and HAKAM, Y.. Load testing and settlement of shallow foundation on desert sands, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering**, vol. 171, n°1, 2018, pp. 52-63.

TARAWNEH, B., SBITNEV, A. and HAKAM, Y.. Lessons learned from 11 million m² of dynamic compaction and replacement, Proc. of the institution of civil engineers, **Ground improvement**, vol. 170, n° G14, 2017, pp. 208 – 217.

TERZAGHI, K. V. **Theoretical Soil Mechanics**. London: ed. Chapman and Hall, 1943, 510p.

TERZAGHI, K. and PECK, R. (1967) **Soil Mechanics in Engineering Practice - 2nd Edition**, John Wiley, New York.

TEVES, A. da C. **Otimização de acelerômetros MEMS eletroestáticos de alto desempenho**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), USP, 2013, 109p.

TOLEDO JUNIOR, E. G.. **Desenvolvimento de acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018, 84p.

THOME, A.. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, 238p.

TIWARI, S. K. and KUMAWAT, N. K..Recent Developments in Ground Improvement Techniques – A Review, **International Journal of Recent Development in Engineering and Technology**, s/vol., s/ n°, 2014, pp. 67 – 77.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE).**Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material**. Technical Letter N° 1110-1-158, Washington, 1995.

VAN IMPE, W. F. and BOUAZZA, A.. Densification of domestic waste fills by dynamic compaction. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 33, s/n°, 1996, pp. 879 – 887.

VENDRUSCOLO, A. M.. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003, 248p.

VESIC, A. S.. **Bearing capacity of deep foundations in sand**. Highway Research Record, n. 39,1963, p. 112-153.

VESIC, A. S.. Bearing capacity of shallow foundations, **Journal of the soil mechanics and foundations division**, ASCE, vol. 99, n° SM1, 1996, 1975, pp. 45– 73.

VIBROMENARD. **Dynamic Replacement**, 2019, Disponível em<<https://vibromenard.co.uk/technique/dynamic-replacement/>> Acesso em: 01 de Outubro de 2019.

VIM. **Vocabulário internacional de metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**,2012, Disponível em:< http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf > Acesso em: 09 de Abril de 2019.

VITALI, O. P. M.. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, 2008, 152p.

WANG, W., FENG, Q. and YANG, C.. Investigation on the dynamic liquefaction responses of saturated granular soils due to dynamic compaction in coastal area, Science Direct, **Applied Ocean Research**, vol. 89, s/n°, 2019b, pp. 273-283.

WISS, J. F. Construction Vibrations: State of the Art, **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, vol. 107, n° 2, 1981, pp. 167-182.

WOODS, R. D.. **Screening of surface waves in soils**. Tech. Rep, IP-804, University of Michigan, Ann Arbor, 1968.

WU, J. MA, L., SHI, J., SUN, Y., KE, J. and WANG, D.. Investigation of Ground Vibration of Full-Stone Foundation under Dynamic Compaction. **Shock and Vibration**, Hidawi, s/vol., s/n°, 2019, pp.1-11.

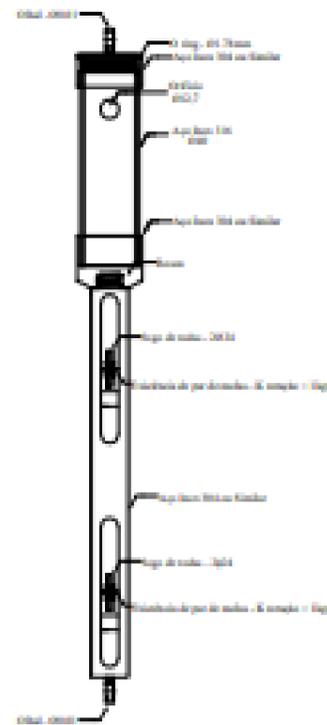
YASROBI, S. S, and ASGHARI, E.. Dynamic compaction in Assalouyeh, Iran. **Proceedings: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, Missouri University of Science and Technology, 2004, pp. 13 – 17.

YAZDI, N., AYAZI, F. and NAJAFI, K.. Micromachined inertial sensors. **Proceedings of IEEE**, vol. 86, n,8, 1998, pp.1640-1659.

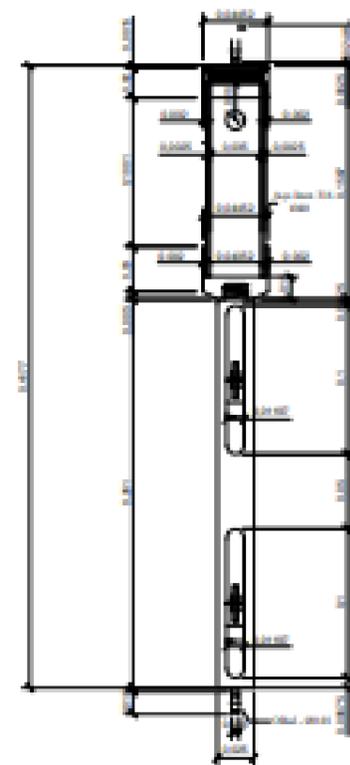
YOUNG, D. M.. **Ground improvement by dynamic compaction**. PhD thesis, National University of Singapore, 1993.

APÊNDICE A
PROJETO GEOMÉTRICO DA SONDA INCLINOMÉTRICA-UFRGS

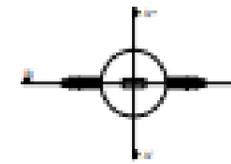
Corte AA' - Detalhe



Corte AA' - Seção Longitudinal



Cortes Longitudinais



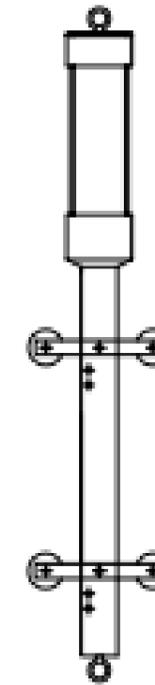
AA' - Tampa + Vedação



BB' - Tampa + Vedação



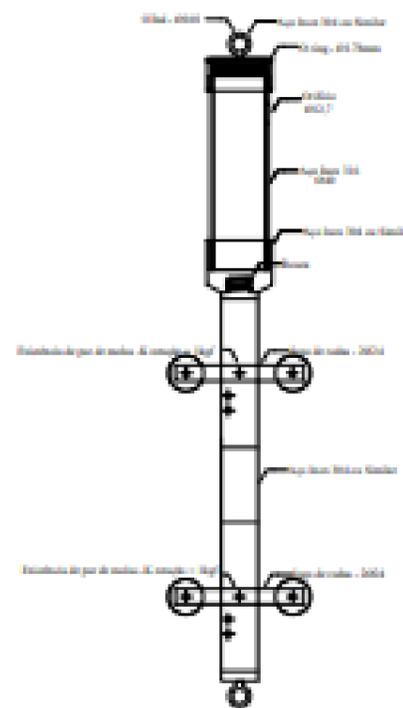
Vista Frontal



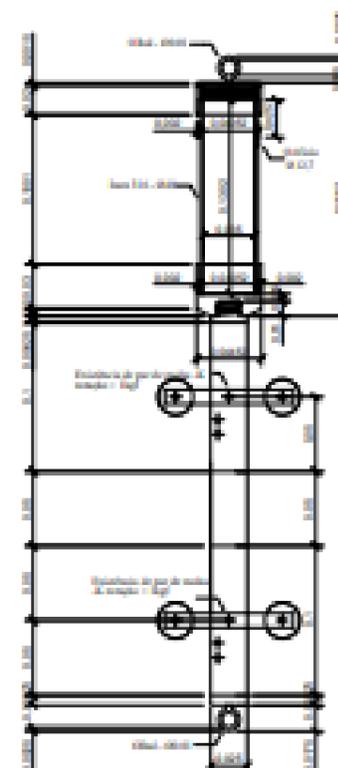
Vista Lateral



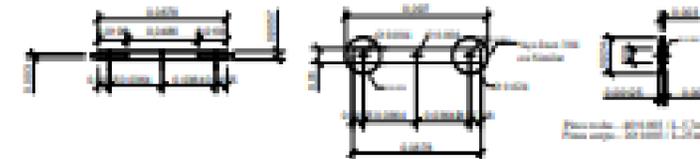
Corte BB' - Detalhe



Corte BB' - Seção longitudinal



Detalhe - Jogo de rodas



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

CLIENTE: TENNISON FREIRE DE SOUZA JR.

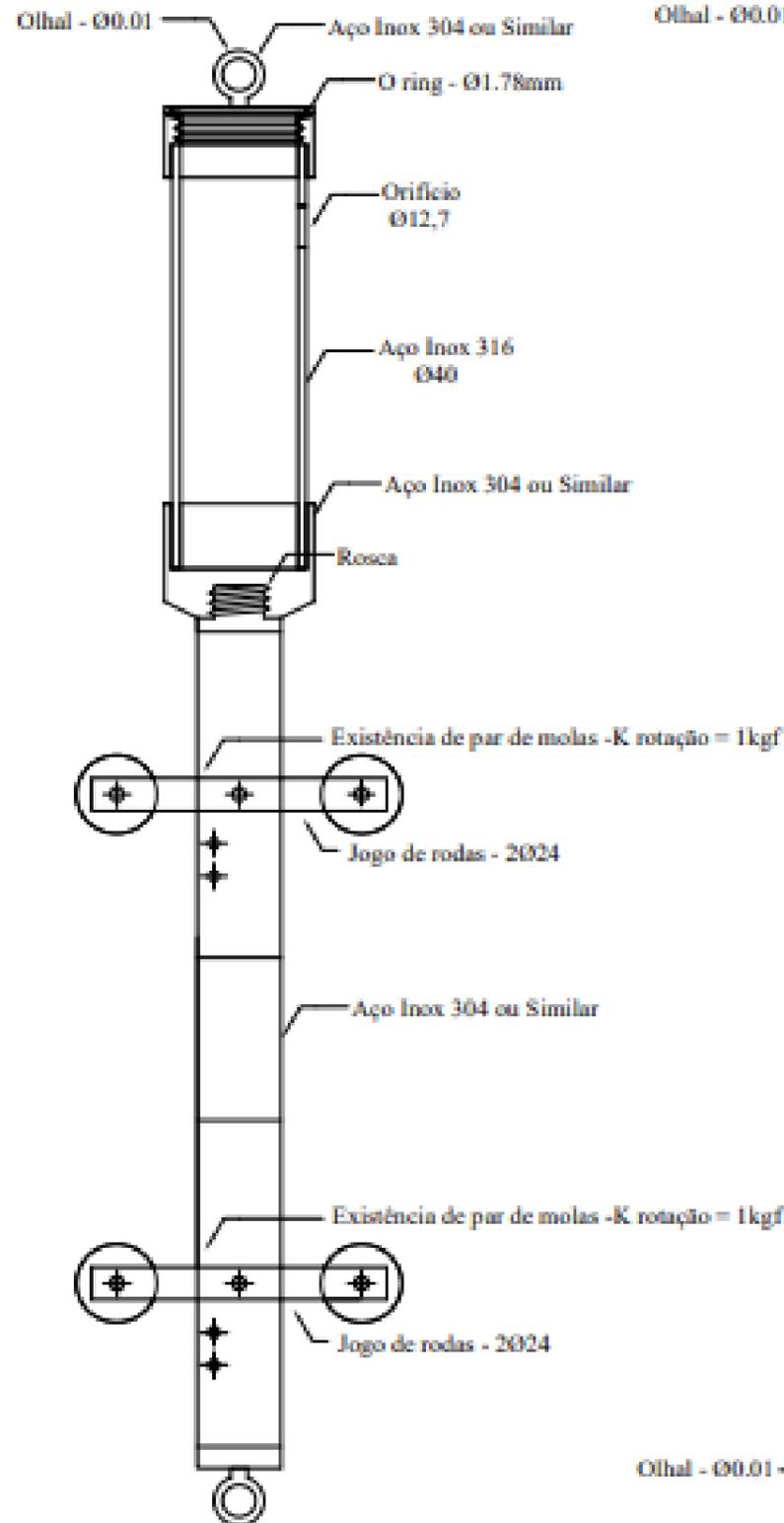
PROJETO: DETALHAMENTO DA SONDA INCLINOMÉTRICA

LOCAL: AV. OSVALDO ARANHA, Nº 99 - ESCOLA DE ENGENHARIA

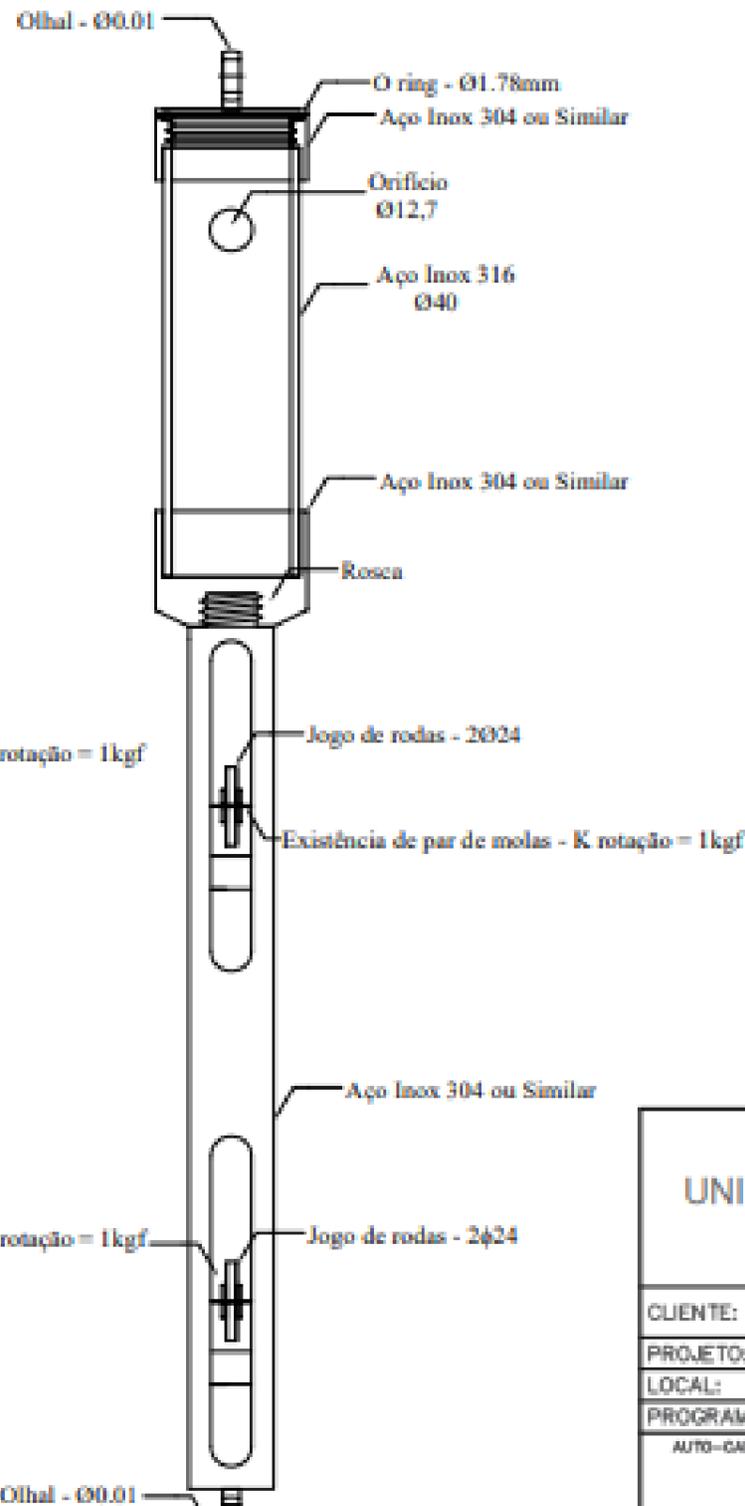
PROGRAMA: PPGE

AUTO-GAB:	DATA:	CONFERIDO:	ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:
TENNISON FREIRE	ESCALA:	MARCELO BOOM	TENNISON FREIRE

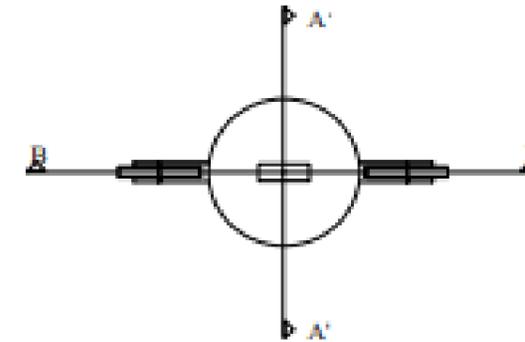
Corte BB'



Corte AA'



Cortes Longitudinais



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

CLIENTE: TENNISON FREIRE DE SOUZA JR.

PROJETO: VISTA DA SONDA INCLINOMÉTRICA

LOCAL: AV. OSVALDO ARANHA, Nº 99 - ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA: PPGECC

AUTO-CAD:

DATA:

CONFERIDO:

ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:

TENNISON FREIRE

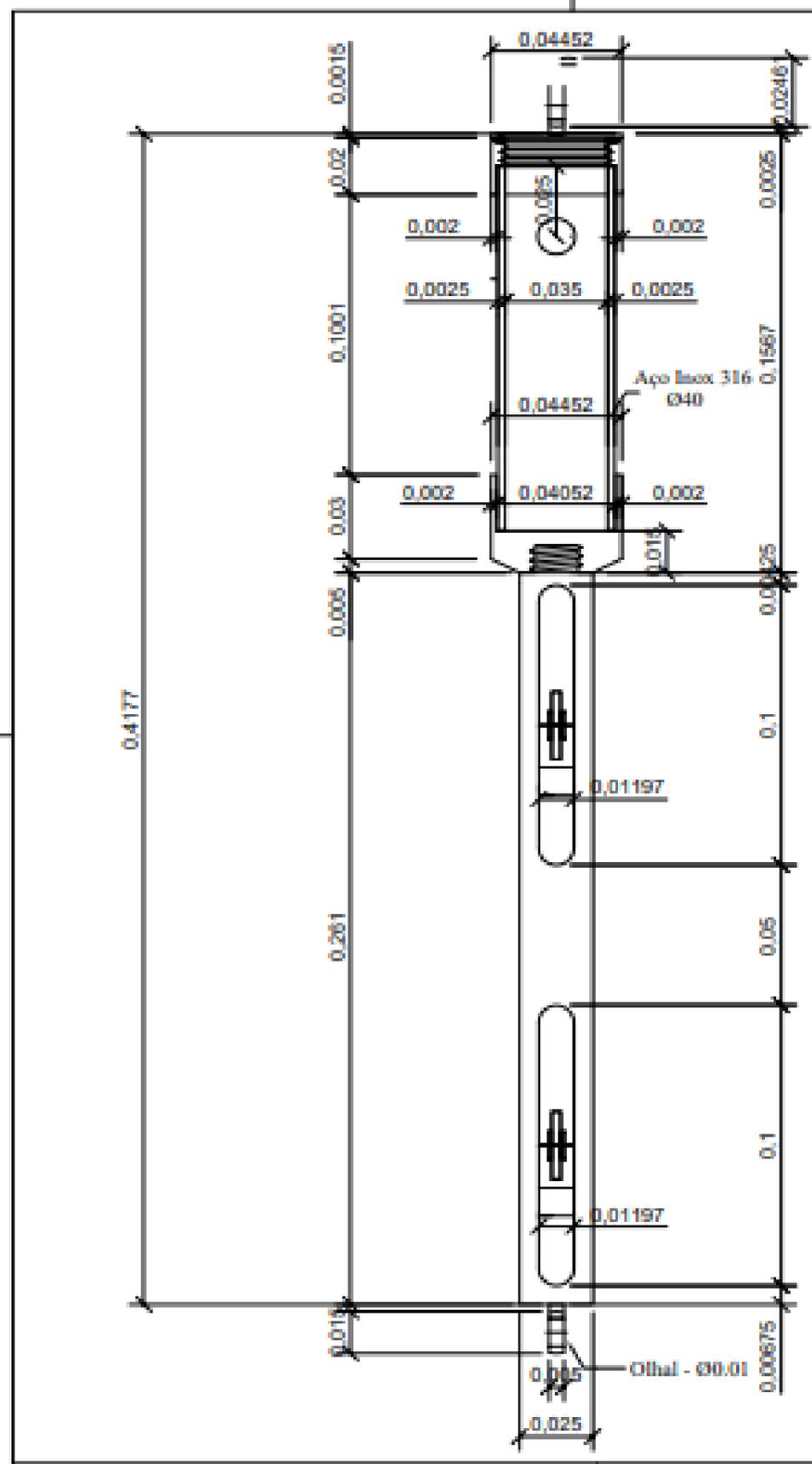
ESCALA:

WILCELO BOHM

TENNISON FREIRE

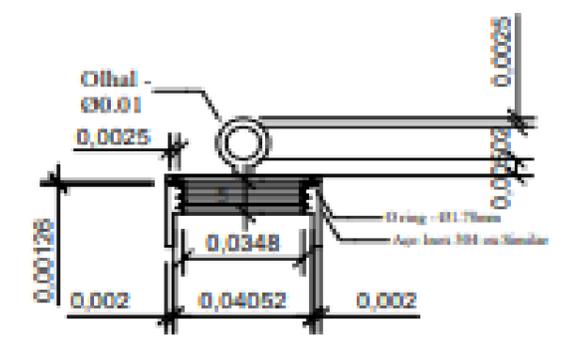
TENNISON FREIRE

FL. 02 / 04

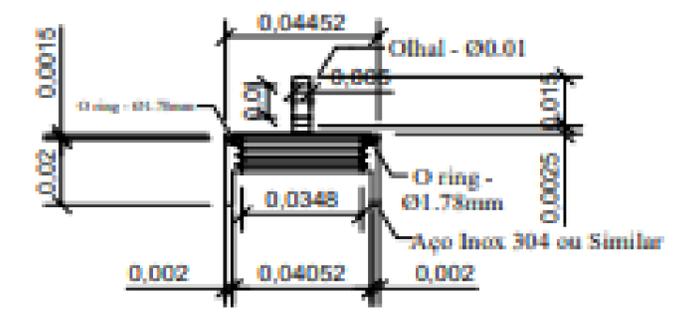


Corte AA' - Seção Longitudinal

AA' - Tampa + Vedação

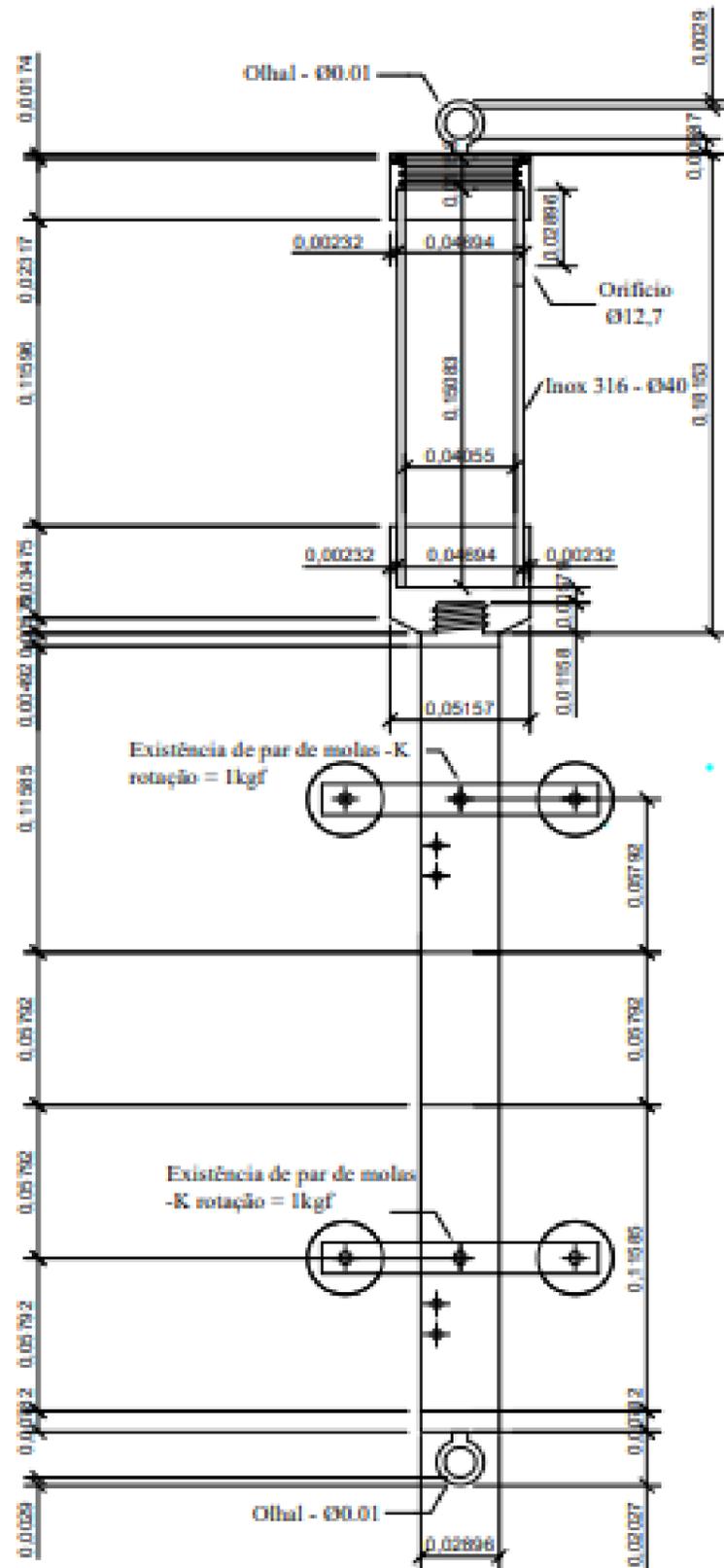


BB' - Tampa + Vedação

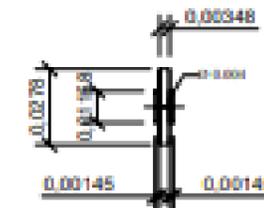
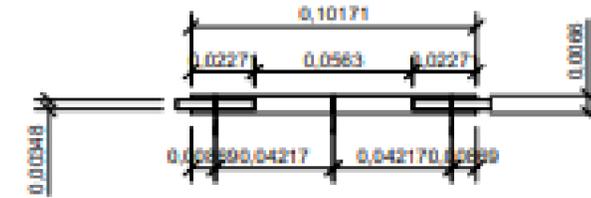
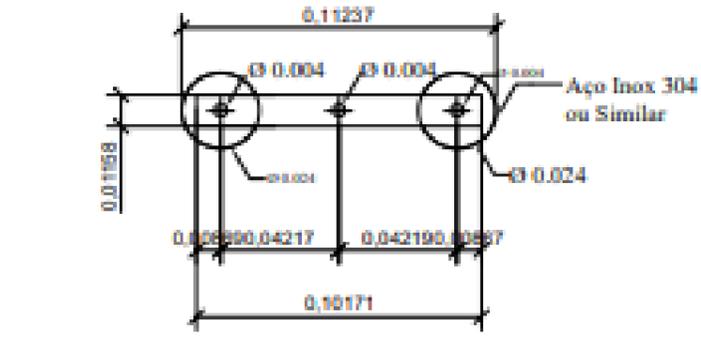


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS				
CLIENTE: TENNISON FREIRE DE SOUZA JR.				
PROJETO: VISTA DA SONDA INCLINOMÉTRICA				
LOCAL: AV. OSVALDO ARANHA, Nº 99 - ESCOLA DE ENGENHARIA				
PROGRAMA: PPGEC				
AUTO-CAD:	DATA:	CONFERIDO:	ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:	
TENNISON FREIRE	ESCALA:	MARCELO ROMAN	TENNISON FREIRE	
				FL. 03 / 04

Detalhe - Jogo de rodas



Corte BB' - Seção longitudinal



Pinos rodas - 4Ø 0.003 / L-5.7mm
Pinos corpo - 2Ø 0.003 / L-25mm

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

CLIENTE: TENNISON FREIRE DE SOUZA JR.

PROJETO: VISTA DA SONDA INCLINOMÉTRICA

LÓCAL: AV. OSVALDO ARANHA, Nº 99 - ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA: PPGE

AUTO-GAD:

DATA:

CONFERIDO:

ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:

TENNISON FREIRE

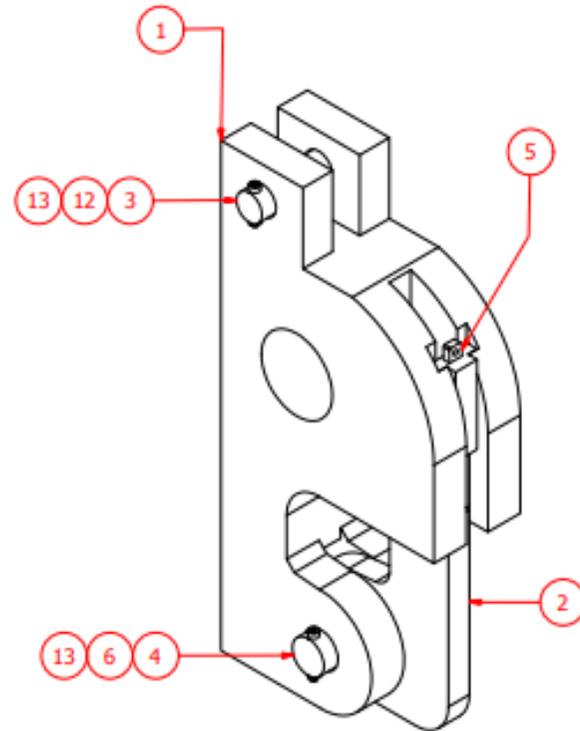
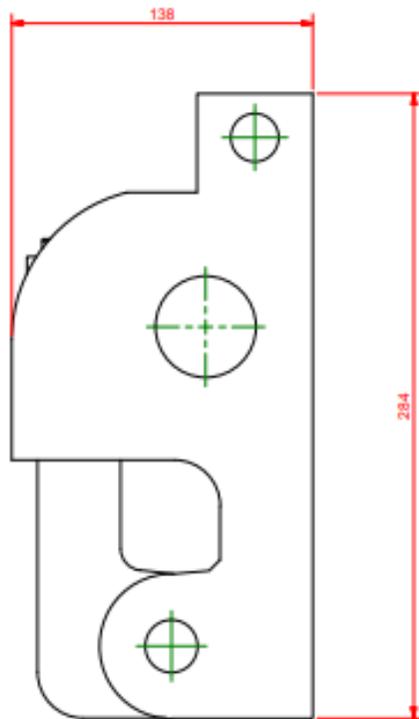
ESCALA:

BARCELO ROOM

TENNISON FREIRE

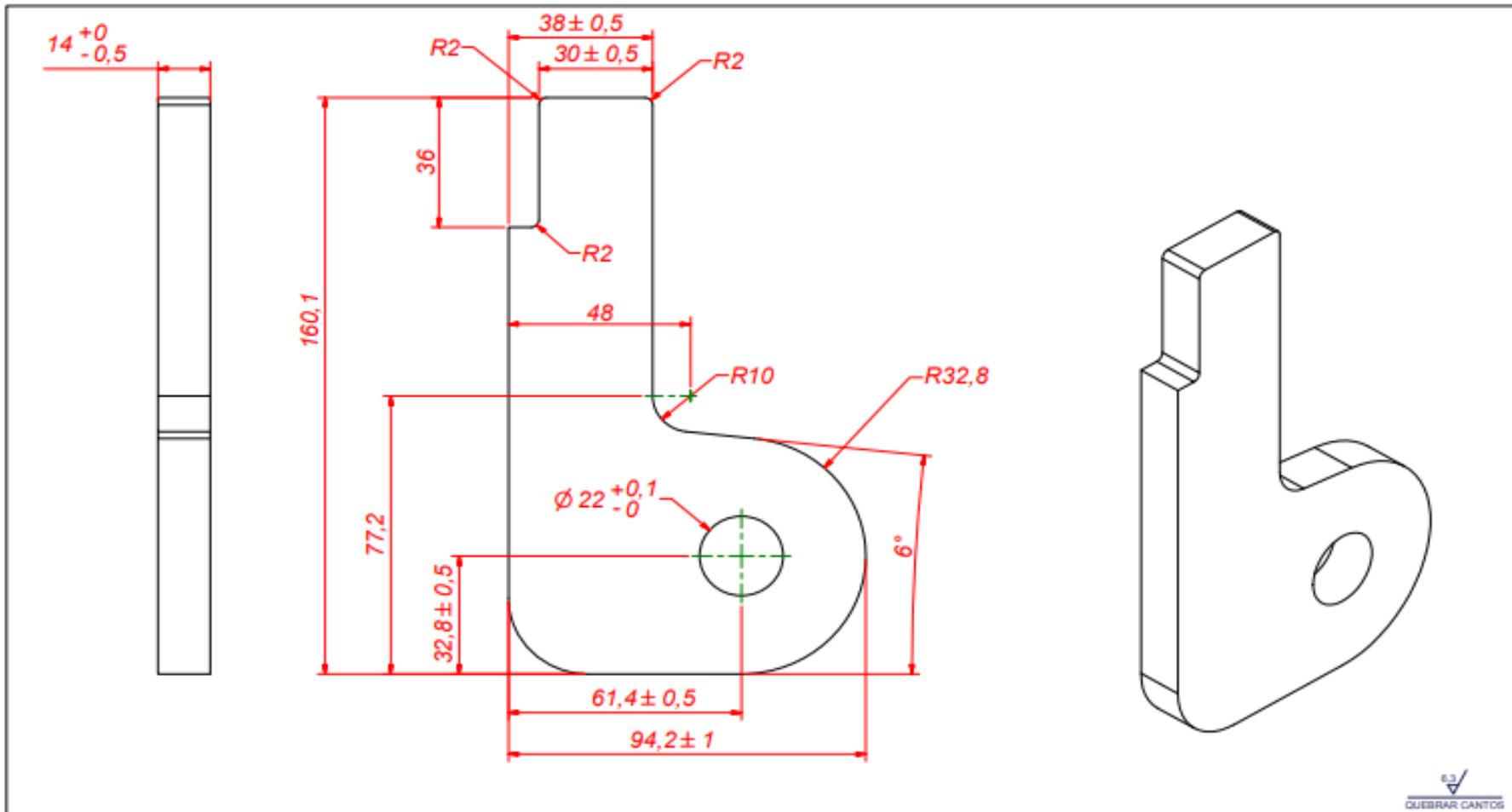
FL. 04 / 04

APÊNDICE B
DETALHAMENTO DO GATILHO (*TRIGGER*)



Item	Qty	Referência	Descrição	MATERIAL
13	2	DIN 934 - M03	Porca Normal	Generic
12	1	DIN 912 - M03 x 020	Parafuso Allen c/ Cab.	Generic
6	1	DIN 912 - M03 x 025	Parafuso Allen c/ Cab.	INOX
5	1	TRAVA GATILHO	TRAVA GATILHO	SAE 4140
4	1	PINO DO EIXO DO GATILHO	PINO DO EIXO DO GATILHO	SAE 1020
3	1	PINO DA ALAVANCA	PINO DA ALAVANCA	SAE 4140
2	1	GATILHO	GATILHO	SAE 4140
1	1	CORPO DO GATILHO	CORPO DO GATILHO	SAE 4140

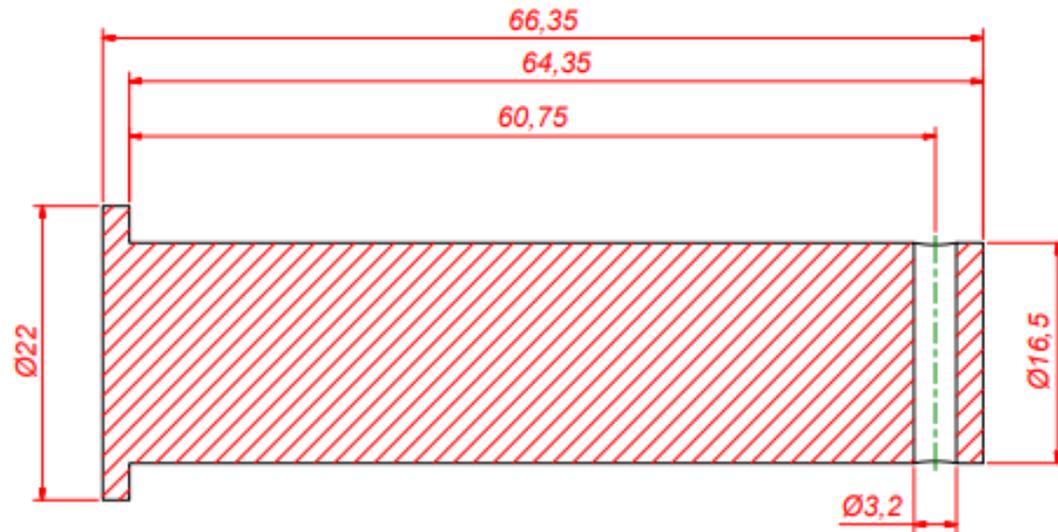
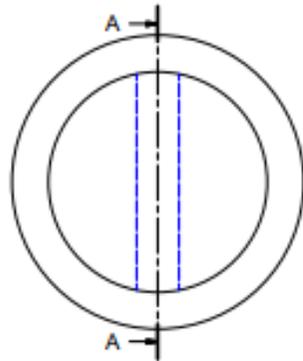
AUTORIZAÇÃO PARA EXECUÇÃO: AUTORIZAÇÃO DE PRODUÇÃO DE PARTES PARA REPARAÇÃO DE MÁQUINAS COMERCIAIS E INDUSTRIAIS REPERTEC S/A - C/AV. DA INDÚSTRIA, 100 FLORES DE MARÍLIA, SP - BRASIL C.P. 13.080-000 - FONE: (19) 3333.1000	DESCRIÇÃO: GATILHO		DATA: 08/11/2018	
	CONDIÇÃO:		QTD POR CORTE: 1	
	MATERIAL:		TRAT. SUPERFICIAL:	
	TRAT. TÉRMICO: X-X-X		PROF. CAMADA: X-X-X	
DURABIL.: X-X-X		DUREZA: X-X-X		
COTAS NÃO TOLERADAS, CONSIDERAR TABELA ABAIXO: (CONFORME DIN 2768)				
DESENHISTA:		ESCALA: 1:2		
FORMATO: A3		FOLHA: 1/1		
DESENHO Nº:		REV.:		
GATILHO				



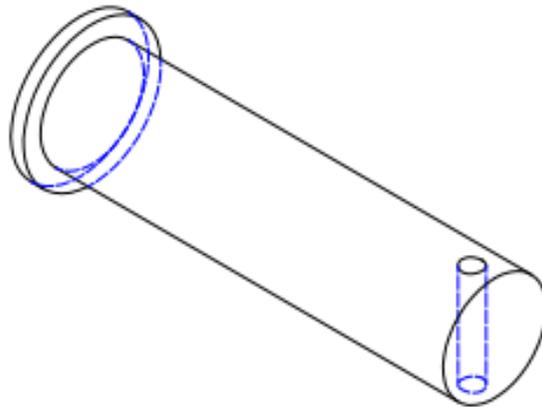
QUEBRAR CANTOS

PMAQ
INDUSTRIA DE MAQUINAS LTDA

ESTABELECIDO EM CONFORMIDADE COM: PMAQ INDUSTRIA DE MAQUINAS LTDA, AS INFORMAÇÕES CONTIDAS NESTE PROJETO SÃO DE RESPONSABILIDADE EXCLUSIVA DA EMPRESA E NÃO SE ENQUADRAM NA LEGISLAÇÃO VIGENTE, OUTRAS LEIS, DECRETOS, PORTARIAS, RESOLUÇÕES, ETC.	DESCRIÇÃO:	GATILHO	DATA:	09/11/2018																																								
	CONJUNTO:		QTD. P/ COPIA:	1																																								
	MATERIAL:	SAE 4140	TRAT. SUPERFICIAL:																																									
	TRAT. TERMICO:	TEMPERA	PROF. CAMADA:	X-X-X																																								
			DUREZA:	30-36 HRC																																								
COTAS NÃO TOLERADAS, CONSIDERAR TABELA ABAIXO: (CORPORAL 208-2108)			DESENHISTA:																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">COMPRIMENTOS E DIÂMETROS</th> <th colspan="2">TOLERÂNCIAS</th> </tr> <tr> <th>DE</th> <th>ATE</th> <th>ISO</th> <th>ASME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>3</td> <td>H9</td> <td>H8</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>6</td> <td>H8</td> <td>H7</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>30</td> <td>H7</td> <td>H6</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>100</td> <td>H6</td> <td>H5</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>300</td> <td>H5</td> <td>H4</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>1000</td> <td>H4</td> <td>H3</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>3000</td> <td>H3</td> <td>H2</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>10000</td> <td>H2</td> <td>H1</td> </tr> </tbody> </table>			COMPRIMENTOS E DIÂMETROS		TOLERÂNCIAS		DE	ATE	ISO	ASME	0	3	H9	H8	3	6	H8	H7	6	30	H7	H6	30	100	H6	H5	100	300	H5	H4	300	1000	H4	H3	1000	3000	H3	H2	3000	10000	H2	H1	ESCALA:	1:2
COMPRIMENTOS E DIÂMETROS		TOLERÂNCIAS																																										
DE	ATE	ISO	ASME																																									
0	3	H9	H8																																									
3	6	H8	H7																																									
6	30	H7	H6																																									
30	100	H6	H5																																									
100	300	H5	H4																																									
300	1000	H4	H3																																									
1000	3000	H3	H2																																									
3000	10000	H2	H1																																									
			FORMATO:	A3																																								
			DESENHO Nº:	GATILHO																																								
			FOLHA:	1/1																																								
			REV.:																																									

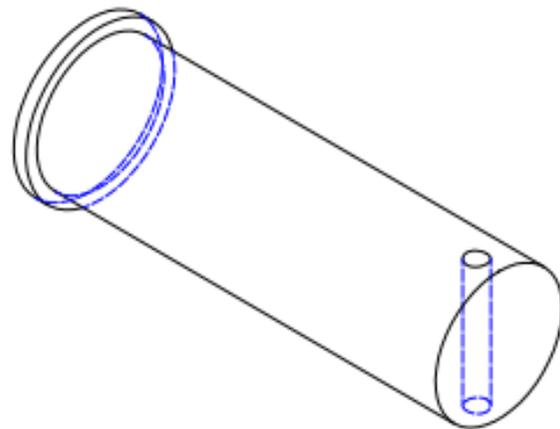
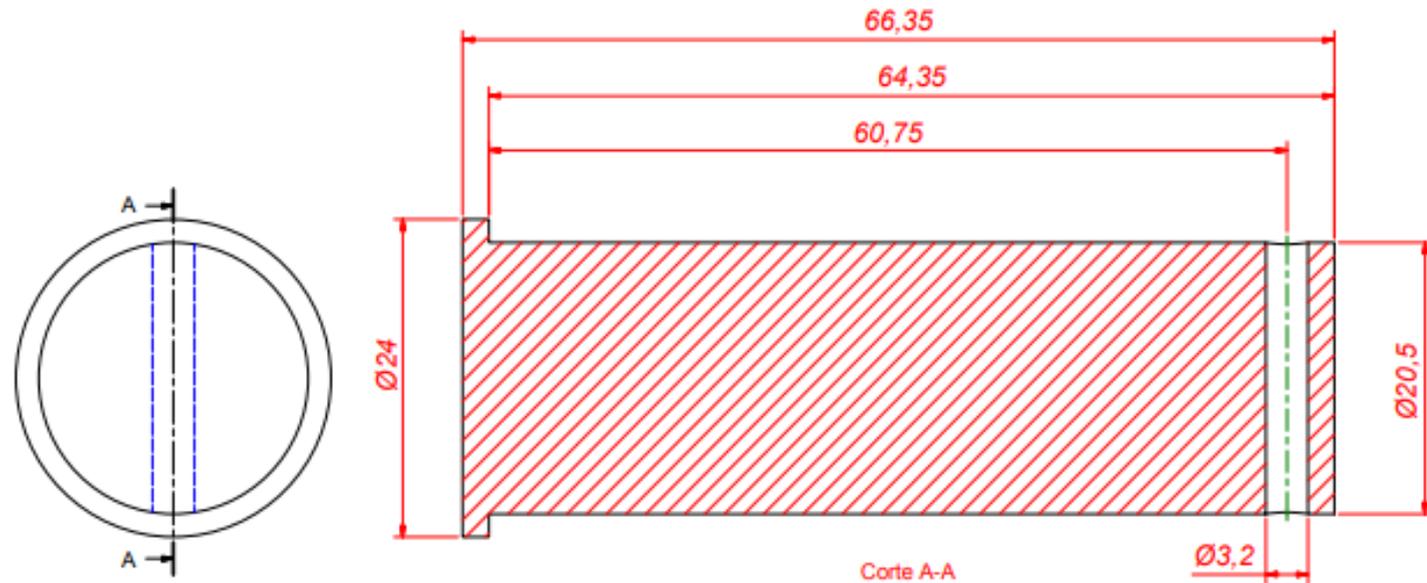


Corte A-A

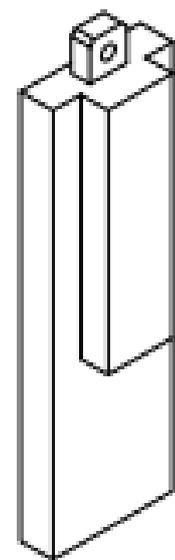
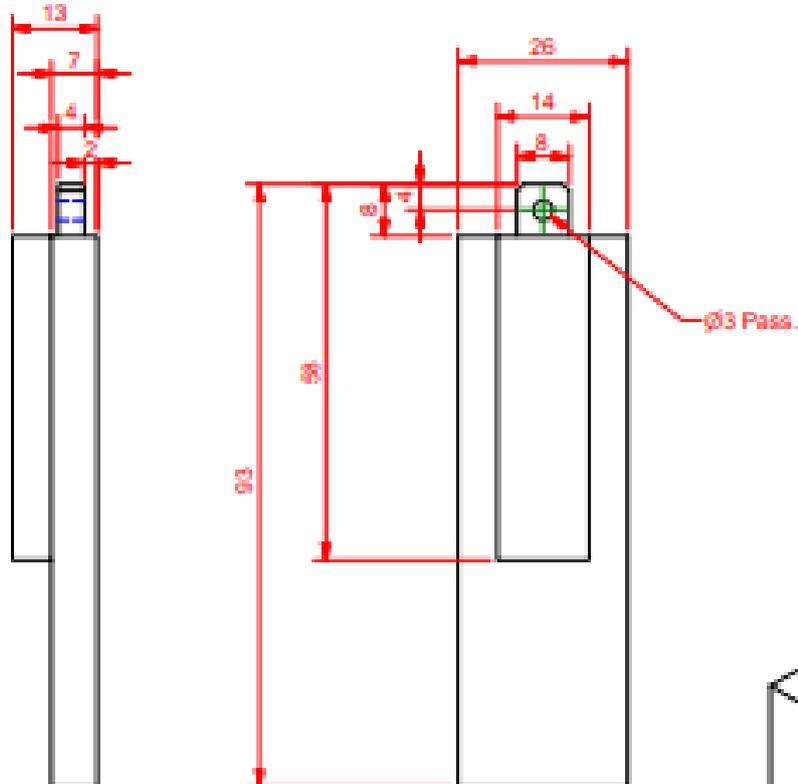


PMAQ INDUSTRIA DE MAQUINAS LTDA CONTIEM INFORMAÇÕES PROTEGIDAS AUTORIZADO PARA USO INTERNO DA EMPRESA. QUALQUER USO NÃO AUTORIZADO É PROIBIDO.	DESCRIÇÃO:	PINO DA ALAVANCA		DATA:	31/07/2019
	CONDICÃO:			QTD. PI. CORU.:	1
	MATERIAL:	SAE 1020	TRAT. SUPERFICIAL:	OXIDACÃO NEGRA	
	TRAT. TERMICO:	X-X-X	PROF. CAMADA:	X-X-X	DUREZA:
COTAS NÃO TOLERADAS, CONSIDERAR TABELA ABAIXO: (CONFORME DIN 2768)					
COMPRIMENTOS E DIÂMETROS				ESCALA:	3:1
				FORMATO:	A3
				DESENHO Nº:	PINO DA ALAVANCA
				FOLHA:	1/1
				REV.:	





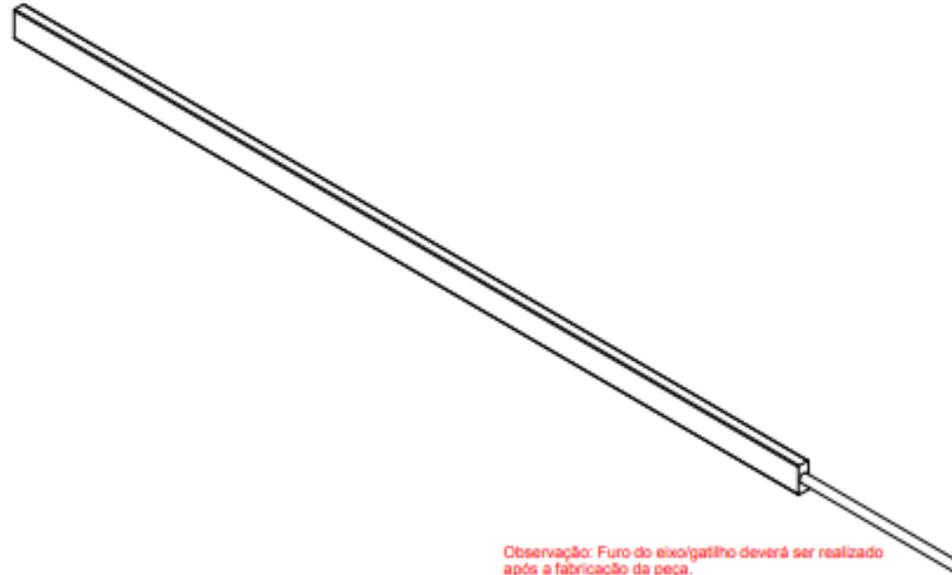
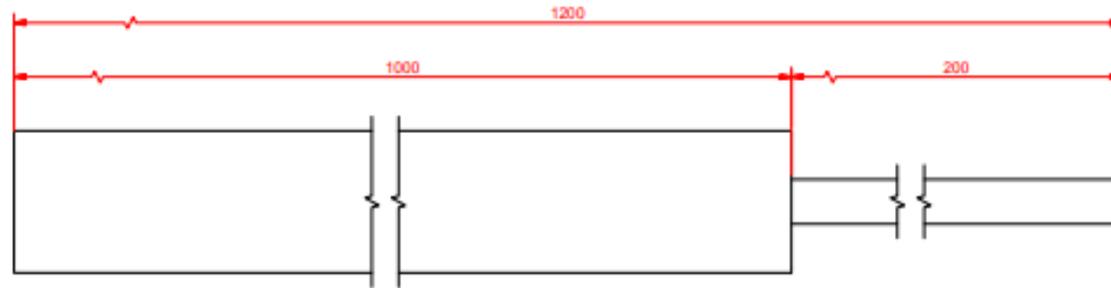
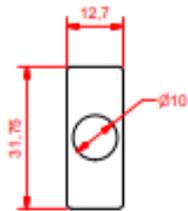
<small> ENTENDIMENTO DE PROPRIEDADES DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS CONSULTORIA E SERVIÇOS TÉCNICOS PROJETOS ESTATÍSTICOS, DE MANUTENÇÃO E OPERACIONAIS PARA A INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS </small>	DESIGNAÇÃO: PINO DO EIXO DO GATILHO	DATA: 31/07/2019	<small> 6.3 QUEBRAR CANTOS </small>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	CONTEÚDO:	COT. PT. COMU.: 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
MATERIAL: SAE 4140	TRAT. SUPERFICIAL: OXIDAÇÃO NEGRA	INDÚSTRIA DE MÁQUINAS LTDA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
TRAT. TÉRMICO: TEMPERA	PREF. CAMADA: X-X-X	DUREZA: 30-36 HRC																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
COTAS NÃO TOLERADAS, CONSIDERAR TABELA ABAIXO: (COMP. OBR. 036.2708)			DESENHISTA:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">COMPRIMENTOS E DIÂMETROS</th> <th colspan="2">VALORES</th> <th colspan="2">TOLERÂNCIAS</th> </tr> <tr> <th>Ø</th> <th>COMPR.</th> <th>Ø</th> <th>COMPR.</th> <th>Ø</th> <th>COMPR.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.5</td> <td>3</td> <td>0.5</td> <td>30</td> <td>±0.02</td> <td>±0.02</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>10</td> <td>0.5</td> <td>60</td> <td>±0.03</td> <td>±0.03</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>15</td> <td>0.5</td> <td>90</td> <td>±0.04</td> <td>±0.04</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>20</td> <td>0.5</td> <td>120</td> <td>±0.05</td> <td>±0.05</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>25</td> <td>0.5</td> <td>150</td> <td>±0.06</td> <td>±0.06</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>30</td> <td>0.5</td> <td>180</td> <td>±0.07</td> <td>±0.07</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>35</td> <td>0.5</td> <td>210</td> <td>±0.08</td> <td>±0.08</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>40</td> <td>0.5</td> <td>240</td> <td>±0.09</td> <td>±0.09</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>45</td> <td>0.5</td> <td>270</td> <td>±0.10</td> <td>±0.10</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>50</td> <td>0.5</td> <td>300</td> <td>±0.11</td> <td>±0.11</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>55</td> <td>0.5</td> <td>330</td> <td>±0.12</td> <td>±0.12</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>60</td> <td>0.5</td> <td>360</td> <td>±0.13</td> <td>±0.13</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>65</td> <td>0.5</td> <td>390</td> <td>±0.14</td> <td>±0.14</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>70</td> <td>0.5</td> <td>420</td> <td>±0.15</td> <td>±0.15</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>75</td> <td>0.5</td> <td>450</td> <td>±0.16</td> <td>±0.16</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>80</td> <td>0.5</td> <td>480</td> <td>±0.17</td> <td>±0.17</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>85</td> <td>0.5</td> <td>510</td> <td>±0.18</td> <td>±0.18</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>90</td> <td>0.5</td> <td>540</td> <td>±0.19</td> <td>±0.19</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>95</td> <td>0.5</td> <td>570</td> <td>±0.20</td> <td>±0.20</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>100</td> <td>0.5</td> <td>600</td> <td>±0.21</td> <td>±0.21</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>105</td> <td>0.5</td> <td>630</td> <td>±0.22</td> <td>±0.22</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>110</td> <td>0.5</td> <td>660</td> <td>±0.23</td> <td>±0.23</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>115</td> <td>0.5</td> <td>690</td> <td>±0.24</td> <td>±0.24</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>120</td> <td>0.5</td> <td>720</td> <td>±0.25</td> <td>±0.25</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>125</td> <td>0.5</td> <td>750</td> <td>±0.26</td> <td>±0.26</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>130</td> <td>0.5</td> <td>780</td> <td>±0.27</td> <td>±0.27</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>135</td> <td>0.5</td> <td>810</td> <td>±0.28</td> <td>±0.28</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>140</td> <td>0.5</td> <td>840</td> <td>±0.29</td> <td>±0.29</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>145</td> <td>0.5</td> <td>870</td> <td>±0.30</td> <td>±0.30</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>150</td> <td>0.5</td> <td>900</td> <td>±0.31</td> <td>±0.31</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>155</td> <td>0.5</td> <td>930</td> <td>±0.32</td> <td>±0.32</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>160</td> <td>0.5</td> <td>960</td> <td>±0.33</td> <td>±0.33</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>165</td> <td>0.5</td> <td>990</td> <td>±0.34</td> <td>±0.34</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>170</td> <td>0.5</td> <td>1020</td> <td>±0.35</td> <td>±0.35</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>175</td> <td>0.5</td> <td>1050</td> <td>±0.36</td> <td>±0.36</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>180</td> <td>0.5</td> <td>1080</td> <td>±0.37</td> <td>±0.37</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>185</td> <td>0.5</td> <td>1110</td> <td>±0.38</td> <td>±0.38</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>190</td> <td>0.5</td> <td>1140</td> <td>±0.39</td> <td>±0.39</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>195</td> <td>0.5</td> <td>1170</td> <td>±0.40</td> <td>±0.40</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>200</td> <td>0.5</td> <td>1200</td> <td>±0.41</td> <td>±0.41</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>205</td> <td>0.5</td> <td>1230</td> <td>±0.42</td> <td>±0.42</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>210</td> <td>0.5</td> <td>1260</td> <td>±0.43</td> <td>±0.43</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>215</td> <td>0.5</td> <td>1290</td> <td>±0.44</td> <td>±0.44</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>220</td> <td>0.5</td> <td>1320</td> <td>±0.45</td> <td>±0.45</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>225</td> <td>0.5</td> <td>1350</td> <td>±0.46</td> <td>±0.46</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>230</td> <td>0.5</td> <td>1380</td> <td>±0.47</td> <td>±0.47</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>235</td> <td>0.5</td> <td>1410</td> <td>±0.48</td> <td>±0.48</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>240</td> <td>0.5</td> <td>1440</td> <td>±0.49</td> <td>±0.49</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>245</td> <td>0.5</td> <td>1470</td> <td>±0.50</td> <td>±0.50</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>250</td> <td>0.5</td> <td>1500</td> <td>±0.51</td> <td>±0.51</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>255</td> <td>0.5</td> <td>1530</td> <td>±0.52</td> <td>±0.52</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>260</td> <td>0.5</td> <td>1560</td> <td>±0.53</td> <td>±0.53</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>265</td> <td>0.5</td> <td>1590</td> <td>±0.54</td> <td>±0.54</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>270</td> <td>0.5</td> <td>1620</td> <td>±0.55</td> <td>±0.55</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>275</td> <td>0.5</td> <td>1650</td> <td>±0.56</td> <td>±0.56</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>280</td> <td>0.5</td> <td>1680</td> <td>±0.57</td> <td>±0.57</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>285</td> <td>0.5</td> <td>1710</td> <td>±0.58</td> <td>±0.58</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>290</td> <td>0.5</td> <td>1740</td> <td>±0.59</td> <td>±0.59</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>295</td> <td>0.5</td> <td>1770</td> <td>±0.60</td> <td>±0.60</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>300</td> <td>0.5</td> <td>1800</td> <td>±0.61</td> <td>±0.61</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>305</td> <td>0.5</td> <td>1830</td> <td>±0.62</td> <td>±0.62</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>310</td> <td>0.5</td> <td>1860</td> <td>±0.63</td> <td>±0.63</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>315</td> <td>0.5</td> <td>1890</td> <td>±0.64</td> <td>±0.64</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>320</td> <td>0.5</td> <td>1920</td> <td>±0.65</td> <td>±0.65</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>325</td> <td>0.5</td> <td>1950</td> <td>±0.66</td> <td>±0.66</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>330</td> <td>0.5</td> <td>1980</td> <td>±0.67</td> <td>±0.67</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>335</td> <td>0.5</td> <td>2010</td> <td>±0.68</td> <td>±0.68</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>340</td> <td>0.5</td> <td>2040</td> <td>±0.69</td> <td>±0.69</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>345</td> <td>0.5</td> <td>2070</td> <td>±0.70</td> <td>±0.70</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>350</td> <td>0.5</td> <td>2100</td> <td>±0.71</td> <td>±0.71</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>355</td> <td>0.5</td> <td>2130</td> <td>±0.72</td> <td>±0.72</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>360</td> <td>0.5</td> <td>2160</td> <td>±0.73</td> <td>±0.73</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>365</td> <td>0.5</td> <td>2190</td> <td>±0.74</td> <td>±0.74</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>370</td> <td>0.5</td> <td>2220</td> <td>±0.75</td> <td>±0.75</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>375</td> <td>0.5</td> <td>2250</td> <td>±0.76</td> <td>±0.76</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>380</td> <td>0.5</td> <td>2280</td> <td>±0.77</td> <td>±0.77</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>385</td> <td>0.5</td> <td>2310</td> <td>±0.78</td> <td>±0.78</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>390</td> <td>0.5</td> <td>2340</td> <td>±0.79</td> <td>±0.79</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>395</td> <td>0.5</td> <td>2370</td> <td>±0.80</td> <td>±0.80</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>400</td> <td>0.5</td> <td>2400</td> <td>±0.81</td> <td>±0.81</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>405</td> <td>0.5</td> <td>2430</td> <td>±0.82</td> <td>±0.82</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>410</td> <td>0.5</td> <td>2460</td> <td>±0.83</td> <td>±0.83</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>415</td> <td>0.5</td> <td>2490</td> <td>±0.84</td> <td>±0.84</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>420</td> <td>0.5</td> <td>2520</td> <td>±0.85</td> <td>±0.85</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>425</td> <td>0.5</td> <td>2550</td> <td>±0.86</td> <td>±0.86</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>430</td> <td>0.5</td> <td>2580</td> <td>±0.87</td> <td>±0.87</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>435</td> <td>0.5</td> <td>2610</td> <td>±0.88</td> <td>±0.88</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>440</td> <td>0.5</td> <td>2640</td> <td>±0.89</td> <td>±0.89</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>445</td> <td>0.5</td> <td>2670</td> <td>±0.90</td> <td>±0.90</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>450</td> <td>0.5</td> <td>2700</td> <td>±0.91</td> <td>±0.91</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>455</td> <td>0.5</td> <td>2730</td> <td>±0.92</td> <td>±0.92</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>460</td> <td>0.5</td> <td>2760</td> <td>±0.93</td> <td>±0.93</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>465</td> <td>0.5</td> <td>2790</td> <td>±0.94</td> <td>±0.94</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>470</td> <td>0.5</td> <td>2820</td> <td>±0.95</td> <td>±0.95</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>475</td> <td>0.5</td> <td>2850</td> <td>±0.96</td> <td>±0.96</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>480</td> <td>0.5</td> <td>2880</td> <td>±0.97</td> <td>±0.97</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>485</td> <td>0.5</td> <td>2910</td> <td>±0.98</td> <td>±0.98</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>490</td> <td>0.5</td> <td>2940</td> <td>±0.99</td> <td>±0.99</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>495</td> <td>0.5</td> <td>2970</td> <td>±1.00</td> <td>±1.00</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>500</td> <td>0.5</td> <td>3000</td> <td>±1.01</td> <td>±1.01</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>505</td> <td>0.5</td> <td>3030</td> <td>±1.02</td> <td>±1.02</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>510</td> <td>0.5</td> <td>3060</td> <td>±1.03</td> <td>±1.03</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>515</td> <td>0.5</td> <td>3090</td> <td>±1.04</td> <td>±1.04</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>520</td> <td>0.5</td> <td>3120</td> <td>±1.05</td> <td>±1.05</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>525</td> <td>0.5</td> <td>3150</td> <td>±1.06</td> <td>±1.06</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>530</td> <td>0.5</td> <td>3180</td> <td>±1.07</td> <td>±1.07</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>535</td> <td>0.5</td> <td>3210</td> <td>±1.08</td> <td>±1.08</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>540</td> <td>0.5</td> <td>3240</td> <td>±1.09</td> <td>±1.09</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>545</td> <td>0.5</td> <td>3270</td> <td>±1.10</td> <td>±1.10</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>550</td> <td>0.5</td> <td>3300</td> <td>±1.11</td> <td>±1.11</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>555</td> <td>0.5</td> <td>3330</td> <td>±1.12</td> <td>±1.12</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>560</td> <td>0.5</td> <td>3360</td> <td>±1.13</td> <td>±1.13</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>565</td> <td>0.5</td> <td>3390</td> <td>±1.14</td> <td>±1.14</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>570</td> <td>0.5</td> <td>3420</td> <td>±1.15</td> <td>±1.15</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>575</td> <td>0.5</td> <td>3450</td> <td>±1.16</td> <td>±1.16</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>580</td> <td>0.5</td> <td>3480</td> <td>±1.17</td> <td>±1.17</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>585</td> <td>0.5</td> <td>3510</td> <td>±1.18</td> <td>±1.18</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>590</td> <td>0.5</td> <td>3540</td> <td>±1.19</td> <td>±1.19</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>595</td> <td>0.5</td> <td>3570</td> <td>±1.20</td> <td>±1.20</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>600</td> <td>0.5</td> <td>3600</td> <td>±1.21</td> <td>±1.21</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>605</td> <td>0.5</td> <td>3630</td> <td>±1.22</td> <td>±1.22</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>610</td> <td>0.5</td> <td>3660</td> <td>±1.23</td> <td>±1.23</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>615</td> <td>0.5</td> <td>3690</td> <td>±1.24</td> <td>±1.24</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>620</td> <td>0.5</td> <td>3720</td> <td>±1.25</td> <td>±1.25</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>625</td> <td>0.5</td> <td>3750</td> <td>±1.26</td> <td>±1.26</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>630</td> <td>0.5</td> <td>3780</td> <td>±1.27</td> <td>±1.27</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>635</td> <td>0.5</td> <td>3810</td> <td>±1.28</td> <td>±1.28</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>640</td> <td>0.5</td> <td>3840</td> <td>±1.29</td> <td>±1.29</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>645</td> <td>0.5</td> <td>3870</td> <td>±1.30</td> <td>±1.30</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>650</td> <td>0.5</td> <td>3900</td> <td>±1.31</td> <td>±1.31</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>655</td> <td>0.5</td> <td>3930</td> <td>±1.32</td> <td>±1.32</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>660</td> <td>0.5</td> <td>3960</td> <td>±1.33</td> <td>±1.33</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>665</td> <td>0.5</td> <td>3990</td> <td>±1.34</td> <td>±1.34</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>670</td> <td>0.5</td> <td>4020</td> <td>±1.35</td> <td>±1.35</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>675</td> <td>0.5</td> <td>4050</td> <td>±1.36</td> <td>±1.36</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>680</td> <td>0.5</td> <td>4080</td> <td>±1.37</td> <td>±1.37</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>685</td> <td>0.5</td> <td>4110</td> <td>±1.38</td> <td>±1.38</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>690</td> <td>0.5</td> <td>4140</td> <td>±1.39</td> <td>±1.39</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>695</td> <td>0.5</td> <td>4170</td> <td>±1.40</td> <td>±1.40</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>700</td> <td>0.5</td> <td>4200</td> <td>±1.41</td> <td>±1.41</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>705</td> <td>0.5</td> <td>4230</td> <td>±1.42</td> <td>±1.42</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>710</td> <td>0.5</td> <td>4260</td> <td>±1.43</td> <td>±1.43</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>715</td> <td>0.5</td> <td>4290</td> <td>±1.44</td> <td>±1.44</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>720</td> <td>0.5</td> <td>4320</td> <td>±1.45</td> <td>±1.45</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>725</td> <td>0.5</td> <td>4350</td> <td>±1.46</td> <td>±1.46</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>730</td> <td>0.5</td> <td>4380</td> <td>±1.47</td> <td>±1.47</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>735</td> <td>0.5</td> <td>4410</td> <td>±1.48</td> <td>±1.48</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>740</td> <td>0.5</td> <td>4440</td> <td>±1.49</td> <td>±1.49</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>745</td> <td>0.5</td> <td>4470</td> <td>±1.50</td> <td>±1.50</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>750</td> <td>0.5</td> <td>4500</td> <td>±1.51</td> <td>±1.51</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>755</td> <td>0.5</td> <td>4530</td> <td>±1.52</td> <td>±1.52</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>760</td> <td>0.5</td> <td>4560</td> <td>±1.53</td> <td>±1.53</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>765</td> <td>0.5</td> <td>4590</td> <td>±1.54</td> <td>±1.54</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>770</td> <td>0.5</td> <td>4620</td> <td>±1.55</td> <td>±1.55</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>775</td> <td>0.5</td> <td>4650</td> <td>±1.56</td> <td>±1.56</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>780</td> <td>0.5</td> <td>4680</td> <td>±1.57</td> <td>±1.57</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>785</td> <td>0.5</td> <td>4710</td> <td>±1.58</td> <td>±1.58</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>790</td> <td>0.5</td> <td>4740</td> <td>±1.59</td> <td>±1.59</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>795</td> <td>0.5</td> <td>4770</td> <td>±1.60</td> <td>±1.60</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>800</td> <td>0.5</td> <td>4800</td> <td>±1.61</td> <td>±1.61</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>805</td> <td>0.5</td> <td>4830</td> <td>±1.62</td> <td>±1.62</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>810</td> <td>0.5</td> <td>4860</td> <td>±1.63</td> <td>±1.63</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>815</td> <td>0.5</td> <td>4890</td> <td>±1.64</td> <td>±1.64</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>820</td> <td>0.5</td> <td>4920</td> <td>±1.65</td> <td>±1.65</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>825</td> <td>0.5</td> <td>4950</td> <td>±1.66</td> <td>±1.66</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>830</td> <td>0.5</td> <td>4980</td> <td>±1.67</td> <td>±1.67</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>835</td> <td>0.5</td> <td>5010</td> <td>±1.68</td> <td>±1.68</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>840</td> <td>0.5</td> <td>5040</td> <td>±1.69</td> <td>±1.69</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>845</td> <td>0.5</td> <td>5070</td> <td>±1.70</td> <td>±1.70</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>850</td> <td>0.5</td> <td>5100</td> <td>±1.71</td> <td>±1.71</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>855</td> <td>0.5</td> <td>5130</td> <td>±1.72</td> <td>±1.72</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>860</td> <td>0.5</td> <td>5160</td> <td>±1.73</td> <td>±1.73</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>865</td> <td>0.5</td> <td>5190</td> <td>±1.74</td> <td>±1.74</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>870</td> <td>0.5</td> <td>5220</td> <td>±1.75</td> <td>±1.75</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>875</td> <td>0.5</td> <td>5250</td> <td>±1.76</td> <td>±1.76</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>880</td> <td>0.5</td> <td>5280</td> <td>±1.77</td> <td>±1.77</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td></td></tr></tbody></table>		COMPRIMENTOS E DIÂMETROS		VALORES		TOLERÂNCIAS		Ø	COMPR.	Ø	COMPR.	Ø	COMPR.	0.5	3	0.5	30	±0.02	±0.02	0.5	10	0.5	60	±0.03	±0.03	0.5	15	0.5	90	±0.04	±0.04	0.5	20	0.5	120	±0.05	±0.05	0.5	25	0.5	150	±0.06	±0.06	0.5	30	0.5	180	±0.07	±0.07	0.5	35	0.5	210	±0.08	±0.08	0.5	40	0.5	240	±0.09	±0.09	0.5	45	0.5	270	±0.10	±0.10	0.5	50	0.5	300	±0.11	±0.11	0.5	55	0.5	330	±0.12	±0.12	0.5	60	0.5	360	±0.13	±0.13	0.5	65	0.5	390	±0.14	±0.14	0.5	70	0.5	420	±0.15	±0.15	0.5	75	0.5	450	±0.16	±0.16	0.5	80	0.5	480	±0.17	±0.17	0.5	85	0.5	510	±0.18	±0.18	0.5	90	0.5	540	±0.19	±0.19	0.5	95	0.5	570	±0.20	±0.20	0.5	100	0.5	600	±0.21	±0.21	0.5	105	0.5	630	±0.22	±0.22	0.5	110	0.5	660	±0.23	±0.23	0.5	115	0.5	690	±0.24	±0.24	0.5	120	0.5	720	±0.25	±0.25	0.5	125	0.5	750	±0.26	±0.26	0.5	130	0.5	780	±0.27	±0.27	0.5	135	0.5	810	±0.28	±0.28	0.5	140	0.5	840	±0.29	±0.29	0.5	145	0.5	870	±0.30	±0.30	0.5	150	0.5	900	±0.31	±0.31	0.5	155	0.5	930	±0.32	±0.32	0.5	160	0.5	960	±0.33	±0.33	0.5	165	0.5	990	±0.34	±0.34	0.5	170	0.5	1020	±0.35	±0.35	0.5	175	0.5	1050	±0.36	±0.36	0.5	180	0.5	1080	±0.37	±0.37	0.5	185	0.5	1110	±0.38	±0.38	0.5	190	0.5	1140	±0.39	±0.39	0.5	195	0.5	1170	±0.40	±0.40	0.5	200	0.5	1200	±0.41	±0.41	0.5	205	0.5	1230	±0.42	±0.42	0.5	210	0.5	1260	±0.43	±0.43	0.5	215	0.5	1290	±0.44	±0.44	0.5	220	0.5	1320	±0.45	±0.45	0.5	225	0.5	1350	±0.46	±0.46	0.5	230	0.5	1380	±0.47	±0.47	0.5	235	0.5	1410	±0.48	±0.48	0.5	240	0.5	1440	±0.49	±0.49	0.5	245	0.5	1470	±0.50	±0.50	0.5	250	0.5	1500	±0.51	±0.51	0.5	255	0.5	1530	±0.52	±0.52	0.5	260	0.5	1560	±0.53	±0.53	0.5	265	0.5	1590	±0.54	±0.54	0.5	270	0.5	1620	±0.55	±0.55	0.5	275	0.5	1650	±0.56	±0.56	0.5	280	0.5	1680	±0.57	±0.57	0.5	285	0.5	1710	±0.58	±0.58	0.5	290	0.5	1740	±0.59	±0.59	0.5	295	0.5	1770	±0.60	±0.60	0.5	300	0.5	1800	±0.61	±0.61	0.5	305	0.5	1830	±0.62	±0.62	0.5	310	0.5	1860	±0.63	±0.63	0.5	315	0.5	1890	±0.64	±0.64	0.5	320	0.5	1920	±0.65	±0.65	0.5	325	0.5	1950	±0.66	±0.66	0.5	330	0.5	1980	±0.67	±0.67	0.5	335	0.5	2010	±0.68	±0.68	0.5	340	0.5	2040	±0.69	±0.69	0.5	345	0.5	2070	±0.70	±0.70	0.5	350	0.5	2100	±0.71	±0.71	0.5	355	0.5	2130	±0.72	±0.72	0.5	360	0.5	2160	±0.73	±0.73	0.5	365	0.5	2190	±0.74	±0.74	0.5	370	0.5	2220	±0.75	±0.75	0.5	375	0.5	2250	±0.76	±0.76	0.5	380	0.5	2280	±0.77	±0.77	0.5	385	0.5	2310	±0.78	±0.78	0.5	390	0.5	2340	±0.79	±0.79	0.5	395	0.5	2370	±0.80	±0.80	0.5	400	0.5	2400	±0.81	±0.81	0.5	405	0.5	2430	±0.82	±0.82	0.5	410	0.5	2460	±0.83	±0.83	0.5	415	0.5	2490	±0.84	±0.84	0.5	420	0.5	2520	±0.85	±0.85	0.5	425	0.5	2550	±0.86	±0.86	0.5	430	0.5	2580	±0.87	±0.87	0.5	435	0.5	2610	±0.88	±0.88	0.5	440	0.5	2640	±0.89	±0.89	0.5	445	0.5	2670	±0.90	±0.90	0.5	450	0.5	2700	±0.91	±0.91	0.5	455	0.5	2730	±0.92	±0.92	0.5	460	0.5	2760	±0.93	±0.93	0.5	465	0.5	2790	±0.94	±0.94	0.5	470	0.5	2820	±0.95	±0.95	0.5	475	0.5	2850	±0.96	±0.96	0.5	480	0.5	2880	±0.97	±0.97	0.5	485	0.5	2910	±0.98	±0.98	0.5	490	0.5	2940	±0.99	±0.99	0.5	495	0.5	2970	±1.00	±1.00	0.5	500	0.5	3000	±1.01	±1.01	0.5	505	0.5	3030	±1.02	±1.02	0.5	510	0.5	3060	±1.03	±1.03	0.5	515	0.5	3090	±1.04	±1.04	0.5	520	0.5	3120	±1.05	±1.05	0.5	525	0.5	3150	±1.06	±1.06	0.5	530	0.5	3180	±1.07	±1.07	0.5	535	0.5	3210	±1.08	±1.08	0.5	540	0.5	3240	±1.09	±1.09	0.5	545	0.5	3270	±1.10	±1.10	0.5	550	0.5	3300	±1.11	±1.11	0.5	555	0.5	3330	±1.12	±1.12	0.5	560	0.5	3360	±1.13	±1.13	0.5	565	0.5	3390	±1.14	±1.14	0.5	570	0.5	3420	±1.15	±1.15	0.5	575	0.5	3450	±1.16	±1.16	0.5	580	0.5	3480	±1.17	±1.17	0.5	585	0.5	3510	±1.18	±1.18	0.5	590	0.5	3540	±1.19	±1.19	0.5	595	0.5	3570	±1.20	±1.20	0.5	600	0.5	3600	±1.21	±1.21	0.5	605	0.5	3630	±1.22	±1.22	0.5	610	0.5	3660	±1.23	±1.23	0.5	615	0.5	3690	±1.24	±1.24	0.5	620	0.5	3720	±1.25	±1.25	0.5	625	0.5	3750	±1.26	±1.26	0.5	630	0.5	3780	±1.27	±1.27	0.5	635	0.5	3810	±1.28	±1.28	0.5	640	0.5	3840	±1.29	±1.29	0.5	645	0.5	3870	±1.30	±1.30	0.5	650	0.5	3900	±1.31	±1.31	0.5	655	0.5	3930	±1.32	±1.32	0.5	660	0.5	3960	±1.33	±1.33	0.5	665	0.5	3990	±1.34	±1.34	0.5	670	0.5	4020	±1.35	±1.35	0.5	675	0.5	4050	±1.36	±1.36	0.5	680	0.5	4080	±1.37	±1.37	0.5	685	0.5	4110	±1.38	±1.38	0.5	690	0.5	4140	±1.39	±1.39	0.5	695	0.5	4170	±1.40	±1.40	0.5	700	0.5	4200	±1.41	±1.41	0.5	705	0.5	4230	±1.42	±1.42	0.5	710	0.5	4260	±1.43	±1.43	0.5	715	0.5	4290	±1.44	±1.44	0.5	720	0.5	4320	±1.45	±1.45	0.5	725	0.5	4350	±1.46	±1.46	0.5	730	0.5	4380	±1.47	±1.47	0.5	735	0.5	4410	±1.48	±1.48	0.5	740	0.5	4440	±1.49	±1.49	0.5	745	0.5	4470	±1.50	±1.50	0.5	750	0.5	4500	±1.51	±1.51	0.5	755	0.5	4530	±1.52	±1.52	0.5	760	0.5	4560	±1.53	±1.53	0.5	765	0.5	4590	±1.54	±1.54	0.5	770	0.5	4620	±1.55	±1.55	0.5	775	0.5	4650	±1.56	±1.56	0.5	780	0.5	4680	±1.57	±1.57	0.5	785	0.5	4710	±1.58	±1.58	0.5	790	0.5	4740	±1.59	±1.59	0.5	795	0.5	4770	±1.60	±1.60	0.5	800	0.5	4800	±1.61	±1.61	0.5	805	0.5	4830	±1.62	±1.62	0.5	810	0.5	4860	±1.63	±1.63	0.5	815	0.5	4890	±1.64	±1.64	0.5	820	0.5	4920	±1.65	±1.65	0.5	825	0.5	4950	±1.66	±1.66	0.5	830	0.5	4980	±1.67	±1.67	0.5	835	0.5	5010	±1.68	±1.68	0.5	840	0.5	5040	±1.69	±1.69	0.5	845	0.5	5070	±1.70	±1.70	0.5	850	0.5	5100	±1.71	±1.71	0.5	855	0.5	5130	±1.72	±1.72	0.5	860	0.5	5160	±1.73	±1.73	0.5	865	0.5	5190	±1.74	±1.74	0.5	870	0.5	5220	±1.75	±1.75	0.5	875	0.5	5250	±1.76	±1.76	0.5	880	0.5	5280	±1.77	±1.77	0.5	
COMPRIMENTOS E DIÂMETROS		VALORES		TOLERÂNCIAS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Ø	COMPR.	Ø	COMPR.	Ø	COMPR.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	3	0.5	30	±0.02	±0.02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	10	0.5	60	±0.03	±0.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	15	0.5	90	±0.04	±0.04																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	20	0.5	120	±0.05	±0.05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	25	0.5	150	±0.06	±0.06																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	30	0.5	180	±0.07	±0.07																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	35	0.5	210	±0.08	±0.08																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	40	0.5	240	±0.09	±0.09																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	45	0.5	270	±0.10	±0.10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	50	0.5	300	±0.11	±0.11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	55	0.5	330	±0.12	±0.12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	60	0.5	360	±0.13	±0.13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	65	0.5	390	±0.14	±0.14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	70	0.5	420	±0.15	±0.15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	75	0.5	450	±0.16	±0.16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	80	0.5	480	±0.17	±0.17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	85	0.5	510	±0.18	±0.18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	90	0.5	540	±0.19	±0.19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	95	0.5	570	±0.20	±0.20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	100	0.5	600	±0.21	±0.21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	105	0.5	630	±0.22	±0.22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	110	0.5	660	±0.23	±0.23																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	115	0.5	690	±0.24	±0.24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	120	0.5	720	±0.25	±0.25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	125	0.5	750	±0.26	±0.26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	130	0.5	780	±0.27	±0.27																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	135	0.5	810	±0.28	±0.28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	140	0.5	840	±0.29	±0.29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	145	0.5	870	±0.30	±0.30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	150	0.5	900	±0.31	±0.31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	155	0.5	930	±0.32	±0.32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	160	0.5	960	±0.33	±0.33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	165	0.5	990	±0.34	±0.34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	170	0.5	1020	±0.35	±0.35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	175	0.5	1050	±0.36	±0.36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	180	0.5	1080	±0.37	±0.37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	185	0.5	1110	±0.38	±0.38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	190	0.5	1140	±0.39	±0.39																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	195	0.5	1170	±0.40	±0.40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	200	0.5	1200	±0.41	±0.41																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	205	0.5	1230	±0.42	±0.42																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	210	0.5	1260	±0.43	±0.43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	215	0.5	1290	±0.44	±0.44																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	220	0.5	1320	±0.45	±0.45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	225	0.5	1350	±0.46	±0.46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	230	0.5	1380	±0.47	±0.47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	235	0.5	1410	±0.48	±0.48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	240	0.5	1440	±0.49	±0.49																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	245	0.5	1470	±0.50	±0.50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	250	0.5	1500	±0.51	±0.51																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	255	0.5	1530	±0.52	±0.52																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	260	0.5	1560	±0.53	±0.53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	265	0.5	1590	±0.54	±0.54																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	270	0.5	1620	±0.55	±0.55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	275	0.5	1650	±0.56	±0.56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	280	0.5	1680	±0.57	±0.57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	285	0.5	1710	±0.58	±0.58																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	290	0.5	1740	±0.59	±0.59																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	295	0.5	1770	±0.60	±0.60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	300	0.5	1800	±0.61	±0.61																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	305	0.5	1830	±0.62	±0.62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	310	0.5	1860	±0.63	±0.63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	315	0.5	1890	±0.64	±0.64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	320	0.5	1920	±0.65	±0.65																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	325	0.5	1950	±0.66	±0.66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	330	0.5	1980	±0.67	±0.67																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	335	0.5	2010	±0.68	±0.68																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	340	0.5	2040	±0.69	±0.69																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	345	0.5	2070	±0.70	±0.70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	350	0.5	2100	±0.71	±0.71																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	355	0.5	2130	±0.72	±0.72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	360	0.5	2160	±0.73	±0.73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	365	0.5	2190	±0.74	±0.74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	370	0.5	2220	±0.75	±0.75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	375	0.5	2250	±0.76	±0.76																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	380	0.5	2280	±0.77	±0.77																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	385	0.5	2310	±0.78	±0.78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	390	0.5	2340	±0.79	±0.79																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	395	0.5	2370	±0.80	±0.80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	400	0.5	2400	±0.81	±0.81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	405	0.5	2430	±0.82	±0.82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	410	0.5	2460	±0.83	±0.83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	415	0.5	2490	±0.84	±0.84																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	420	0.5	2520	±0.85	±0.85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	425	0.5	2550	±0.86	±0.86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	430	0.5	2580	±0.87	±0.87																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	435	0.5	2610	±0.88	±0.88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	440	0.5	2640	±0.89	±0.89																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	445	0.5	2670	±0.90	±0.90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	450	0.5	2700	±0.91	±0.91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	455	0.5	2730	±0.92	±0.92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	460	0.5	2760	±0.93	±0.93																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	465	0.5	2790	±0.94	±0.94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	470	0.5	2820	±0.95	±0.95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	475	0.5	2850	±0.96	±0.96																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	480	0.5	2880	±0.97	±0.97																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	485	0.5	2910	±0.98	±0.98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	490	0.5	2940	±0.99	±0.99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	495	0.5	2970	±1.00	±1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	500	0.5	3000	±1.01	±1.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	505	0.5	3030	±1.02	±1.02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	510	0.5	3060	±1.03	±1.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	515	0.5	3090	±1.04	±1.04																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	520	0.5	3120	±1.05	±1.05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	525	0.5	3150	±1.06	±1.06																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	530	0.5	3180	±1.07	±1.07																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	535	0.5	3210	±1.08	±1.08																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	540	0.5	3240	±1.09	±1.09																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	545	0.5	3270	±1.10	±1.10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	550	0.5	3300	±1.11	±1.11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	555	0.5	3330	±1.12	±1.12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	560	0.5	3360	±1.13	±1.13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	565	0.5	3390	±1.14	±1.14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	570	0.5	3420	±1.15	±1.15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	575	0.5	3450	±1.16	±1.16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	580	0.5	3480	±1.17	±1.17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	585	0.5	3510	±1.18	±1.18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	590	0.5	3540	±1.19	±1.19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	595	0.5	3570	±1.20	±1.20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	600	0.5	3600	±1.21	±1.21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	605	0.5	3630	±1.22	±1.22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	610	0.5	3660	±1.23	±1.23																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	615	0.5	3690	±1.24	±1.24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	620	0.5	3720	±1.25	±1.25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	625	0.5	3750	±1.26	±1.26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	630	0.5	3780	±1.27	±1.27																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	635	0.5	3810	±1.28	±1.28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	640	0.5	3840	±1.29	±1.29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	645	0.5	3870	±1.30	±1.30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	650	0.5	3900	±1.31	±1.31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	655	0.5	3930	±1.32	±1.32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	660	0.5	3960	±1.33	±1.33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	665	0.5	3990	±1.34	±1.34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	670	0.5	4020	±1.35	±1.35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	675	0.5	4050	±1.36	±1.36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	680	0.5	4080	±1.37	±1.37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	685	0.5	4110	±1.38	±1.38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	690	0.5	4140	±1.39	±1.39																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	695	0.5	4170	±1.40	±1.40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	700	0.5	4200	±1.41	±1.41																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	705	0.5	4230	±1.42	±1.42																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	710	0.5	4260	±1.43	±1.43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	715	0.5	4290	±1.44	±1.44																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	720	0.5	4320	±1.45	±1.45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	725	0.5	4350	±1.46	±1.46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	730	0.5	4380	±1.47	±1.47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	735	0.5	4410	±1.48	±1.48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	740	0.5	4440	±1.49	±1.49																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	745	0.5	4470	±1.50	±1.50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	750	0.5	4500	±1.51	±1.51																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	755	0.5	4530	±1.52	±1.52																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	760	0.5	4560	±1.53	±1.53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	765	0.5	4590	±1.54	±1.54																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	770	0.5	4620	±1.55	±1.55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	775	0.5	4650	±1.56	±1.56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	780	0.5	4680	±1.57	±1.57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	785	0.5	4710	±1.58	±1.58																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	790	0.5	4740	±1.59	±1.59																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	795	0.5	4770	±1.60	±1.60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	800	0.5	4800	±1.61	±1.61																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	805	0.5	4830	±1.62	±1.62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	810	0.5	4860	±1.63	±1.63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	815	0.5	4890	±1.64	±1.64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	820	0.5	4920	±1.65	±1.65																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	825	0.5	4950	±1.66	±1.66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	830	0.5	4980	±1.67	±1.67																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	835	0.5	5010	±1.68	±1.68																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	840	0.5	5040	±1.69	±1.69																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	845	0.5	5070	±1.70	±1.70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	850	0.5	5100	±1.71	±1.71																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	855	0.5	5130	±1.72	±1.72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	860	0.5	5160	±1.73	±1.73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	865	0.5	5190	±1.74	±1.74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	870	0.5	5220	±1.75	±1.75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	875	0.5	5250	±1.76	±1.76																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5	880	0.5	5280	±1.77	±1.77																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0.5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															



6.3

 QUEBRAR CANTOS

INSTITUICAO DE INGENHARIA PMAQ INDUSTRIA DE MAQUINAS CONTABILIDADE, PRODUCAO E MANUTENCAO DE MAQUINAS EXPERTISAS E PROJETOS AUTOMATIZADOS (CNPJ)	DESCRIÇÃO:	TRAVA GATILHO		DATA:	04/12/2018	 PMAQ INDUSTRIA DE MAQUINAS LTDA.															
	CONJUNTO:			QTD POR CONJ:	1																
	MATERIAL:	SAE 4140	TRAT. SUPERFICIAL:	OXIDACAO NEGRA																	
	TRAT. TERMICO:	TEMPERA	PROF. CAMADA:	X-X-X	DUREZA:	30-38 HRC															
	COTAS NÃO TOLERADAS, CONSIDERAR TABELA ABAIXO: (CONFORME DIM 2188)				DESENHISTA:																
COMPRIMENTOS E DIÂMETROS		RIGID. CONTROL.		RIGID. (LxWxH)mm		ESCALA:	FORMATO:		FOLHA:												
DE	3	4	5	6	8	10	12		15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	100	125	160
USINADO	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±1.5	±1.5	±0.2	±0.3	±0.5	±0.5	±1°	±0.20	±0.25	±0.30	±0.4				
SOLETO	±0.5	±1.0	±1.5	±2.0	±3.0	±4.0	±5.0	±5.0	±0.4	±0.5	±0.5	±0.7	±0°	±0°	±0°	±0.10	±0.15				
DESENHO Nº:								TRAVA GATILHO		REV:											



Observação: Furo do eixo/gatilho deverá ser realizado após a fabricação da peça.

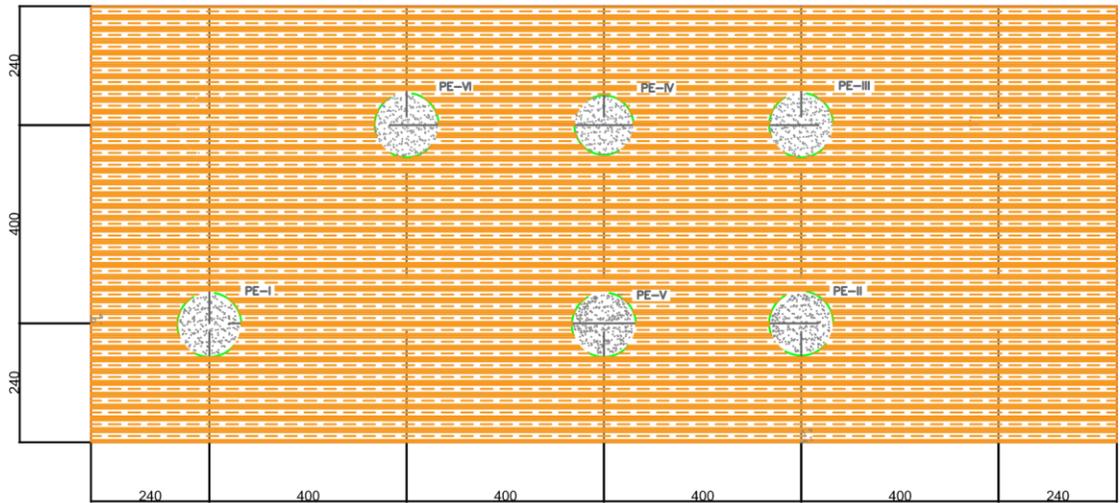
0.3
QUEBRAR CANTOS

SERVIÇOS DE ENGENHARIA CONSULTORIA E PROJETOS CONTABILIDADE E PROJETOS PROJETOS MECÂNICOS, ELÉTRICOS, ESTRUCTURAIS E CIVIS EMPREENDIMENTO INDUSTRIAL S.A.	DESCRIÇÃO:	ALAVANCA DO GATILHO		DATA:	26/08/2019																																																																																																																																																												
	CONJUNTO:			QTD PT. CONS.:	1																																																																																																																																																												
	MATERIAL:	SAE 1020	TRAT. SUPERFICIAL:	OXIDACÃO NEGRA																																																																																																																																																													
	TRAT. TERMICO:	X-X-X	PROF. CAMADA:	X-X-X	DUREZA:	X-X-X																																																																																																																																																											
COTAS NÃO TOLERADAS, CONSIDERAR TABELA ABAIXO: (COMP. C/REGRAS DA ABNT NBR 3708)																																																																																																																																																																	
COMPRIMENTOS E DIÂMETROS				DESENHISTA:																																																																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DE</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> <th>14</th> <th>15</th> <th>16</th> <th>17</th> <th>18</th> <th>19</th> <th>20</th> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> <th>24</th> <th>25</th> <th>26</th> <th>27</th> <th>28</th> <th>29</th> <th>30</th> <th>31</th> <th>32</th> <th>33</th> <th>34</th> <th>35</th> <th>36</th> <th>37</th> <th>38</th> <th>39</th> <th>40</th> <th>41</th> <th>42</th> <th>43</th> <th>44</th> <th>45</th> <th>46</th> <th>47</th> <th>48</th> <th>49</th> <th>50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ABRIGADO</td> <td>45.1</td> <td>45.2</td> <td>45.3</td> <td>45.4</td> <td>45.5</td> <td>45.6</td> <td>45.7</td> <td>45.8</td> <td>45.9</td> <td>46.0</td> <td>46.1</td> <td>46.2</td> <td>46.3</td> <td>46.4</td> <td>46.5</td> <td>46.6</td> <td>46.7</td> <td>46.8</td> <td>46.9</td> <td>47.0</td> <td>47.1</td> <td>47.2</td> <td>47.3</td> <td>47.4</td> <td>47.5</td> <td>47.6</td> <td>47.7</td> <td>47.8</td> <td>47.9</td> <td>48.0</td> <td>48.1</td> <td>48.2</td> <td>48.3</td> <td>48.4</td> <td>48.5</td> <td>48.6</td> <td>48.7</td> <td>48.8</td> <td>48.9</td> <td>49.0</td> <td>49.1</td> <td>49.2</td> <td>49.3</td> <td>49.4</td> <td>49.5</td> <td>49.6</td> <td>49.7</td> <td>49.8</td> <td>49.9</td> <td>50.0</td> </tr> <tr> <td>ABRIGADO</td> <td>45.2</td> <td>45.3</td> <td>45.4</td> <td>45.5</td> <td>45.6</td> <td>45.7</td> <td>45.8</td> <td>45.9</td> <td>46.0</td> <td>46.1</td> <td>46.2</td> <td>46.3</td> <td>46.4</td> <td>46.5</td> <td>46.6</td> <td>46.7</td> <td>46.8</td> <td>46.9</td> <td>47.0</td> <td>47.1</td> <td>47.2</td> <td>47.3</td> <td>47.4</td> <td>47.5</td> <td>47.6</td> <td>47.7</td> <td>47.8</td> <td>47.9</td> <td>48.0</td> <td>48.1</td> <td>48.2</td> <td>48.3</td> <td>48.4</td> <td>48.5</td> <td>48.6</td> <td>48.7</td> <td>48.8</td> <td>48.9</td> <td>49.0</td> <td>49.1</td> <td>49.2</td> <td>49.3</td> <td>49.4</td> <td>49.5</td> <td>49.6</td> <td>49.7</td> <td>49.8</td> <td>49.9</td> <td>50.0</td> </tr> </tbody> </table>				DE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	ABRIGADO	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50.0	ABRIGADO	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50.0	ESCALA:	1:1	FORMATO:	A3	FOLHA:	1/1
DE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50																																																																																																															
ABRIGADO	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50.0																																																																																																															
ABRIGADO	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50.0																																																																																																																
				DESENHO Nº:	ALAVANCA DO GATILHO																																																																																																																																																												
				REV.:																																																																																																																																																													

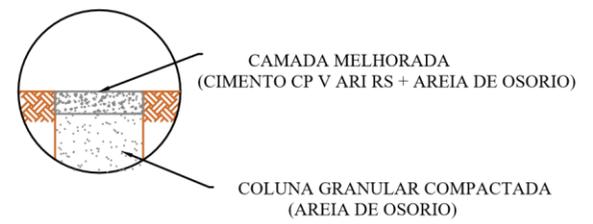
PMAQ
INDUSTRIA DE MÁQUINAS LTDA

APÊNDICE C

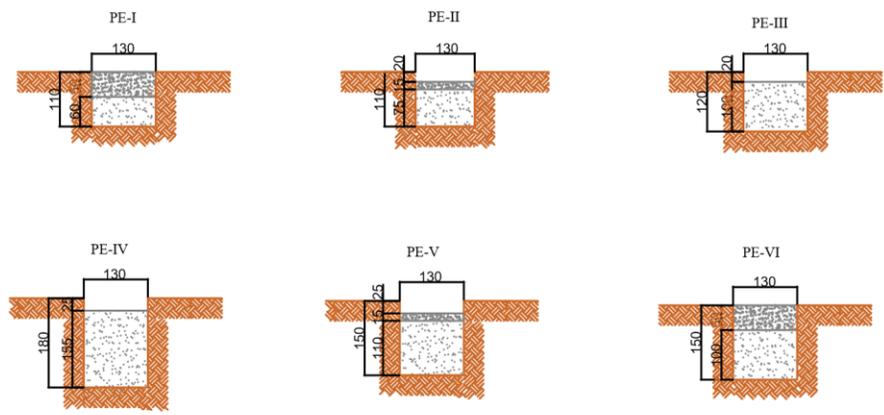
LOCAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO NO CAMPO EXPERIMENTAL



DETALHE DO PERFIL LONGITUDINAL



DETALHAMENTO GEOMÉTRICO DAS COLUNAS DE SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA



obs: As cotas das plantas estão centímetros

TESE DE DOUTORADO - TENNISON FREIRE DE SOUZA JR.

CLIENTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - PPGEC

PROJETO: LOCAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO - SUBSTITUIÇÃO DINÂMICA

LOCAL: AV. OSVALDO ARANHA, Nº 99 - ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA: PPGEC

AUTO-CAD:	DATA:	CONFERIDO:	ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:
TENNISON FREIRE	ESCALA:	TENNISON FREIRE	TENNISON FREIRE

FL. 01 / 01

APÊNDICE D
ENSAIOS TRIAXIAIS CID (CONSOLIDADO ISOTRÓPICO DRENADO) DA
CAMADA MELHORADA COM CIMENTO

Quadro 1 – Relatório de ensaios dos corpos de prova da camada melhorada do PE-II. (Fonte: Própria, 2021)

Condições iniciais	Corpo-de-prova		
	1	2	3
Altura Inicial, h_0 (mm)	100,0	93,5	102,1
Diâmetro, D_0 (mm)	53,2	52,0	52,1
Área, A (cm ²)	22,3	21,2	21,3
Volume, V_0 (cm ³)	222,5	198,4	217,9
Massa Úmida, m (g)	387,96	339,62	391,75
Massa Esp. Grãos, r_s (g/cm ³)	2,63	2,63	2,63
Peso Esp. Aparente, γ_n (kN/m ³)	17,4	17,1	18,0
Drenos Laterais	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
Saturação	1	2	3
Método	Contrapressão		
Pressão diferencial (kPa)	10	10	10
Pressão de câmara final (kPa)	716	861	816
Poropressão final (kPa)	706	851	806
B final	1,00	0,98	1,00
Adensamento	1	2	3
Pressão de câmara (kPa)	727	902	880
Contrapressão (kPa)	707	852	800
Poropressão inicial (kPa)	720	891	882
Poropressão final (kPa)	707	852	805
Pressão efetiva final (kPa)	20	50	75
Grau de adensamento final (%)	100	100	94
Variação volumétrica (cm ³)	-0,23	-1,84	-2,89
Volume, V (cm ³)	222,3	196,6	215,1
Altura, h (mm)	99,9	92,9	101,2
Diâmetro, D (mm)	53,2	51,7	51,6
Drenagem	<i>Topo</i>	<i>Topo</i>	<i>Topo</i>
Cisalhamento	1	2	3
Velocidade de Deformação (mm/min)	0,03	0,03	0,03
Pressão confinante (kPa)	721	899	879
Contrapressão (kPa)	700	849	801
Pressão no CP (kPa)	15	48	73
Critério de Ruptura	Tensão desviadora máxima		
Umidade final, w_f (%)	24,8	28,2	23,4
Variação volumétrica total (adensamento + cisalhamento) (cm ³)	-0,23	-1,84	-2,89
Volume, V_f (cm ³)	222,3	196,6	215,1
Ruptura	1	2	3
Tensão Desviadora Corrigida (kPa)	213	460	750
Deformação Volumétrica (%)	-0,06	-0,24	0,10
Tensão Efetiva Principal Menor - σ'_3 (kPa)	14	48	75
Tensão Efetiva Principal Maior (kPa) - σ'_1 (kPa)	227	508	825
Razão de Tensões Principais	16,20	10,58	11,00

Quadro 2 – Relatório de ensaios dos corpos de prova da camada melhorada do PE-VI. (Fonte: Própria, 2021)

Condições iniciais	Corpo-de-prova		
	1	2	3
Altura Inicial, h_0 (mm)	100,4	100,4	102,1
Diâmetro, D_0 (mm)	53,8	52,6	52,1
Área, A (cm ²)	22,7	21,8	21,3
Volume, V_0 (cm ³)	228,1	218,4	217,9
Massa Úmida, m (g)	375,10	367,91	391,75
Massa Esp. Grãos, r_s (g/cm ³)	2,66	2,66	2,66
Peso Esp. Aparente, γ_n (kN/m ³)	16,4	16,8	18,0
Drenos Laterais	Não	Não	Não
Saturação	1	2	3
Método	Contrapressão		
Pressão diferencial (kPa)	10	10	10
Pressão de câmara final (kPa)	1010	811	1009
Poropressão final (kPa)	1000	801	999
B final	0,95	0,97	0,99
Adensamento	1	2	3
Pressão de câmara (kPa)	1020	855	1079
Contrapressão (kPa)	1000	805	999
Poropressão inicial (kPa)	1000	829	1061
Poropressão final (kPa)	1000	805	999
Pressão efetiva final (kPa)	20	50	80
Grau de adensamento final (%)	100	100	100
Varição volumétrica (cm ³)	-0,26	-1,59	-2,42
Volume, V (cm ³)	227,8	216,8	215,5
Altura, h (mm)	100,3	99,9	101,3
Diâmetro, D (mm)	53,7	52,4	51,7
Drenagem	Topo	Topo	Topo
Cisalhamento	1	2	3
Velocidade de Deformação (mm/min)	0,08	0,08	0,08
Pressão confinante (kPa)	1020	850	1079
Contrapressão (kPa)	1000	799	999
Pressão no CP (kPa)	20	49	80
Critério de Ruptura	Tensão desviadora máxima		
Umidade final, w_f (%)	26,9	24,6	23,4
Varição volumétrica total (adensamento + cisalhamento) (cm ³)	-0,26	-1,59	-2,42
Volume, V_f (cm ³)	227,8	216,8	215,5
Ruptura	1	2	3
Tensão Desviadora Corrigida (kPa)	377	538	948
Deformação Volumétrica (%)	0,26	-0,24	-0,20
Tensão Efetiva Principal Menor - σ'_3 (kPa)	20	49	79
Tensão Efetiva Principal Maior (kPa) - σ'_1 (kPa)	397	587	1027
Razão de Tensões Principais	19,85	11,97	13,00