

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Maurício Affonso Reis de Souza

**INJEÇÃO SUBMERSA DE NATA DE CIMENTO PARA
ESTACAS TORPEDO: ANÁLISE GEOMÉTRICA**

Porto Alegre
julho 2014

MAURÍCIO AFFONSO REIS DE SOUZA

**INJEÇÃO SUBMERSA DE NATA DE CIMENTO PARA
ESTACAS TORPEDO: ANÁLISE GEOMÉTRICA**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lucas Festugato

Porto Alegre
julho 2014

MAURÍCIO AFFONSO REIS DE SOUZA

**INJEÇÃO SUBMERSA DE NATA DE CIMENTO PARA
ESTACAS TORPEDO: ANÁLISE GEOMÉTRICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2014

Prof. Lucas Festugato
Dr. pela UFRGS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo Cesar Consoli
PhD pela Concordia University, Canadá

David Eduardo Lourenço
M. Eng. pela Universidade de Coimbra

Jorge Hernán Flórez Gálvez
M. Eng. pela UFRGS

Dedico este trabalho a minha família e meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, que me deu todo o suporte e estará sempre do meu lado. Em especial ao tripé de suporte, meu pai, minha mãe e minha irmã.

Agradeço também aos meus amigos, por todos os momentos vividos juntos (tanto os bons quanto os ruins) e todas as aprendizagens tiradas de cada um (tanto as boas quanto as ruins). Afinal, quem tem amigo tem tudo

Obrigado também a todos os colegas que dividiram as salas de aula comigo durante os anos da graduação. Foram muitos anos de convivência e ajuda. Um agradecimento em especial ao colega Eduardo Braun, que me ajudou muito na realização dos ensaios, além de dar bons conselhos para a pesquisa.

Agradeço também aos professores e a todos os ensinamentos e dedicação passados. Em especial agradeço ao professor Lucas Festugato, que conheci nos laboratórios da universidade, quando ainda era doutorando, e agora já dá aulas e coordena inúmeras pesquisas. Foram muitos momentos de orientação e dicas de grande valor para a realização deste trabalho.

Um obrigado para a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a todas as pessoas que fazem possível o investimento de educação de qualidade e gratuita nos alunos.

A vida é como andar de bicicleta.
Para manter o equilíbrio, é preciso se manter em movimento.

Albert Einstein

RESUMO

Muito do petróleo explorado no Brasil encontra-se em jazidas marítimas onde a lâmina d'água pode superar os 1000 metros. Essa dificuldade tem impulsionado pesquisas na área para a viabilização econômica deste recurso. Para a extração do petróleo em situações de grande profundidade são empregadas plataformas flutuantes que utilizam sistemas de âncoras para sua operação. Uma destas âncoras é denominada estaca torpedo, a qual tem sido estudada para aprimorar sua tecnologia. Este trabalho versa sobre a pesquisa da forma geométrica adquirida pela nata de cimento injetada em um solo argiloso através de uma haste, que simula a estaca torpedo, a fim de combinar o atual sistema desta estaca à injeção de agente cimentante. No desenvolvimento do trabalho foram analisadas as injeções de nata de cimento através de diversos tipos de hastes em um solo argiloso. As variáveis estudadas foram a velocidade de saída do jato de nata durante a injeção, o número e o diâmetro dos furos de injeção da haste. Devido à inexistência de ensaios adequados para as análises do trabalho, os ensaios executados, em modelo reduzido, foram desenvolvidos por completo nesta pesquisa. As análises das formas geométricas adquiridas pela nata foram feitas através de medidas de seus lados, observando alguns critérios, e da determinação de sua área da base e de seu volume. As fotos e as medidas de cada forma geométrica estão no apêndice do trabalho. Observou-se que das velocidades de saída do jato ensaiadas, a velocidade intermediária de 1,44 m/s tende a formar corpos cimentícios adjacentes à haste com maior volume e área da base, ressalvando a dispersão dos resultados. Também se observou que quanto maior o número de furos, maior tende a ser o volume e a área da base da forma geométrica solidária à haste. Já para o diâmetro dos furos de injeção, notou-se que, quanto maior o diâmetro dos furos, maior tende a ser o volume e a área da base da forma geométrica solidária à haste.

Palavras-chave: Reforço de estaca torpedo. Injeção de nata de cimento em argila.
Forma geométrica de injeção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	19
Figura 2 – Exemplos de estruturas <i>offshore</i> semissubmersíveis (a) FPS e (b) FPSOs	22
Figura 3 – Configurações de linhas de ancoragem (a) sistema em catenária e (b) sistema de cabos esticados	23
Figura 4 – Tipos de ligação entre a estrutura flutuante e as linhas de ancoragem (a) linhas ligadas às extremidades da estrutura e (b) linhas ligadas à torre giratória	24
Figura 5 – Âncoras de sucção	25
Figura 6 – Âncora de arraste	26
Figura 7 – Fases de instalação e rotação da placa da âncora tipo SEPLA	27
Figura 8 – Estacas torpedo utilizadas pela Petrobras	28
Figura 9 – Diferentes formas de estacas torpedo ensaiadas	30
Figura 10 – Etapas de instalação do sistema <i>jet grouting</i>	39
Figura 11 – Mecanismos de interação entre jato de <i>jet grouting</i> e diferentes tipos de solo: a) solo de granulometria muito grosseira, b) solo arenoso e c) solo argiloso	41
Figura 12 – Curva granulométrica do caulim	45
Figura 13– Caulim comercial utilizado nos ensaios	46
Figura 14 – Curva granulométrica da bentonita	47
Figura 15 – Bentonita comercial utilizada nos ensaios	47
Figura 16 – Curva granulométrica da argila	49
Figura 17 – Detalhe dos furos das hastes de injeção	51
Figura 18 – Bomba hidráulica helicoidal utilizada nos ensaios	51
Figura 19 – Inversor de frequência utilizado nos ensaios	52
Figura 20 – Tanque utilizado para os ensaios	52
Figura 21 – Betoneira utilizada nos ensaios	53
Figura 22 – Esquema da distribuição dos equipamentos usados nos ensaios	54
Figura 23 – Cravação da haste para a injeção	55
Figura 24 – Processo de procura da forma geométrica	56
Figura 25 – Exemplo da forma geométrica solidária à haste de injeção	57
Figura 26 – Exemplo de extravasamento da nata de cimento	57
Figura 27 – Partes consideradas e desconsideradas das formas geométricas	62
Figura 28 – Influência da velocidade de saída do jato no volume da forma geométrica .	64
Figura 29 – Influência da velocidade de saída do jato na área da base da forma geométrica	64

Figura 30 – Influência do número de furos de saída do jato no volume da forma geométrica	65
Figura 31 – Influência do número de furos de saída do jato na área da base da forma geométrica	66
Figura 32 – Influência do diâmetro dos furos de injeção no volume da forma geométrica	67
Figura 33 – Influência do diâmetro dos furos de injeção na área da base da forma geométrica	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de planilha eletrônica para o cálculo da escala de grandezas derivadas das grandezas de base	37
Tabela 2 – Propriedades da mistura argilosa	38
Tabela 3 – Propriedades físicas do caulim	46
Tabela 4 – Propriedades físicas da bentonita	47
Tabela 5 – Propriedades da argila	48
Tabela 6 – Propriedades de resistência da argila	49
Tabela 7 – Pré-definições para os ensaios preliminares	53
Tabela 8 – Parâmetros dos ensaios preliminares	54
Tabela 9 – Resultado dos ensaios preliminares	58
Tabela 10 – Programa experimental	60
Tabela 11 – Dimensões, volume e área da base das formas	63
Tabela 12 – Dimensões, volume e área da base em escala real das formas geométricas .	68

LISTA DE SIGLAS

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre/RS

Feeng - Fundação Empresa Escola de Engenharia

FPS - *Floating, Production system*

FPSOs - *Floating Production Storage and Offloading systems*

SEPLA - *Suction Embedment Plate Anchor*

TLP - *Tensions Leg Platforms*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VLA - *Vertical Loading Anchor*

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B e C – escalas das grandezas de base

L, M e T – grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo, respectivamente)

n_L, n_M e n_T – expoentes dimensionais das grandezas fundamentais nas grandezas de base

D – matriz dimensional da nova base

n_A, n_B e n_C – elementos da matriz dimensional invertida da nova base

X – escala da grandeza derivada

α, β e γ – expoentes dimensionais da grandeza derivada

σ_v – tensão vertical total (N/m²)

ρ – massa específica do solo (kg/m³)

g – aceleração da gravidade (m/s²)

z – profundidade medida a partir da superfície do solo (m)

Ψ – Pressão de impacto equivalente (N/m²)

Ω_1 – Parâmetro adimensional que leva em conta a dissipação de energia

γ_f – Peso específico da nata de cimento (N/m³)

v_f – Velocidade de saída do jato nos pontos de contato com o terreno (m/s)

Ψ_c – Resistência à erosão

Ω_3 – Parâmetro adimensional de calibração

S_u – Resistência ao cisalhamento não drenada (N/m²).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	17
2.2.1 Objetivo principal	17
2.2.2 Objetivo secundário	17
2.3 HIPÓTESE.....	18
2.4 PRESSUPOSTO.....	18
2.5 PREMISA.....	18
2.6 DELIMITAÇÕES.....	18
2.7 LIMITAÇÕES.....	18
2.8 DELINEAMENTO.....	18
3 ÂNCORAGEM DE ESTRUTURAS FLUTUANTES	21
3.1 PLATAFORMAS FLUTUANTES.....	21
3.1.1 Plataformas semissubmersíveis (FPS)	21
3.1.2 Plataformas de pernas atirantadas (TLP)	21
3.1.3 Plataformas SPAR	22
3.2 TIPOS DE LINHAS DE ANCORAGEM.....	23
3.3 TIPOS DE ÂNCORAS.....	24
3.3.1 Âncoras de sucção	24
3.3.2 Âncoras de arraste (VLA ou <i>drag embedment anchor</i>)	25
3.3.3 Âncoras SEPLA (<i>suction embedment plate anchor</i>)	26
3.3.4 Estacas torpedo	27
3.3.4.1 Instalação de estacas torpedo.....	29
3.3.4.2 Resultados de testes com estacas torpedo.....	29
4. SEMELHANÇA DE MODELOS REDUZIDOS	31
4.1 CÁLCULO DE ESCALA DE GRANDEZAS DERIVADAS.....	32
4.2 CÁLCULO DE ESCALA DE GRANDEZAS DERIVADAS PARA FENÔMENOS GEOTÉCNICOS.....	35
4.3 CONSIDERAÇÕES DE MATERIAIS EQUIVALENTES EM ARGILAS.....	37
5 INTERAÇÃO ENTRE O SOLO E O JATO DE NATA DE CIMENTO	39
5.1 O SISTEMA <i>JET GROUTING</i>	39
5.2 INTERAÇÃO ENTRE A CALDA DE CIMENTO INJETADA E O SOLO.....	40

5.3 AÇÃO DO JATO DE NATA DE CIMENTO.....	42
5.4 RESISTÊNCIA DO SOLO ARGILOSO AO JATO DE NATA DE CIMENTO.....	42
6 METODOLOGIA DE ENSAIO	44
6.1 ENSAIOS PRELIMINARES	44
6.1.1 Materiais	44
6.1.1.1 Culim	45
6.1.1.2 Bentonita	46
6.1.1.3 Água	48
6.1.1.4 Mistura caulim e bentonita (argila)	48
6.1.1.5 Nata de cimento	50
6.1.2 Equipamentos	50
6.1.2.1 Hastes de injeção	50
6.1.2.2 Bomba hidráulica	51
6.1.2.3 Inversor de frequência	52
6.1.2.4 Tanque de armazenamento do solo	52
6.1.2.5 Betoneira	53
6.1.3 Predefinições para os ensaios preliminares	53
6.1.4 Metodologia dos ensaios preliminares	54
6.1.5 Resultados e análises dos ensaios preliminares	56
6.2 ENSAIOS DEFINITIVOS	58
6.2.1 Metodologia dos ensaios definitivos	59
6.2.2 Programa experimental	59
7 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS	61
7.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME E DA ÁREA DA BASE DAS FORMAS GEOMÉTRICAS SOLIDÁRIAS À HASTE DE INJEÇÃO	61
7.2 DIMENSÕES, VOLUME E ÁREA DA BASE DAS FORMAS GEOMÉTRICAS SOLIDÁRIAS À HASTE DE INJEÇÃO	62
7.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO JATO DE NATA	63
7.4 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FUROS DE SAÍDA DO JATO DE NATA	65
7.5 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DOS FUROS DE SAÍDA DO JATO DE NATA ..	66
7.6 ANÁLISE DAS FORMAS GEOMÉTRICAS EM ESCALA	68
8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
8.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO JATO DE NATA	70
8.2 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FUROS DE INJEÇÃO	70
8.3 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DOS FUROS DE INJEÇÃO	71

8.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	71
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das principais matérias primas para a economia mundial, abrangendo muitos setores, como o de combustíveis, de transportes e de componentes plásticos. Sua utilização e procura vêm aumentando nos últimos anos, fazendo com que novas jazidas sejam exploradas fora da plataforma continental (*offshore*). Em particular no Brasil, a maior parte dos poços exploratórios está nessas condições (MEZZOMO, 2009, p. 19).

Atualmente a tecnologia permite a exploração de poços marítimos em águas profundas (*deep waters*), e estão em desenvolvimento novas tecnologias para a exploração em águas ultraprofundas, com lâminas de água de mais de 1000 metros. Segundo Sharma (2004, p. 2), são denominadas águas profundas aquelas cuja lâmina de água seja superior a 400 metros, fazendo com que o apoio de plataformas diretamente ao leito marítimo seja técnica e economicamente inviável. Com isso são utilizadas unidades flutuantes, que são ancoradas ao leito marítimo, surgindo um dos principais desafios para a engenharia de fundações.

As principais formas de ancoragem desses sistemas flutuantes são: âncoras de arraste (VLA), estacas de sucção, âncoras SEPLA e âncoras de penetração dinâmica (estacas torpedo) (MEZZOMO, 2009, p. 20). Essas últimas são estacas desenvolvidas pela Petrobras, em forma de torpedo, que penetram ao leito marítimo por queda livre submersa.

Com o desejo de aprimorar a tecnologia de ancoragem de estruturas flutuantes *offshore*, em especial estacas torpedo, a Petrobras, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Fundação Empresa-Escola de Engenharia (Feeng) lançaram o Projeto Petrobras na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, denominado "Sistemas de Jateamento, Transferência de Carga e Melhoramentos de Solo". O presente trabalho faz parte de uma etapa dessa parceria, sendo que outros trabalhos (graduação, mestrado e doutorado) da mesma linha de pesquisa já foram desenvolvidos e, juntamente com esse, serão feitas novas pesquisas sobre fluidização e reforço de solo.

Este trabalho tem, então, o objetivo de estudar a injeção de agente cimentante em um solo argiloso, a fim de analisar as variáveis de injeção que possam influenciar na forma que o fluido injetado adquire após sua aplicação.

No segundo capítulo deste trabalho são determinadas as diretrizes da pesquisa, incluindo os objetivos da mesma. Posteriormente, nos capítulos seguintes, é feita a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao trabalho a fim de servir de suporte à pesquisa. São abordadas as principais estruturas de ancoramento de plataformas flutuantes e suas principais características. Posteriormente é apresentada a análise dimensional para compatibilização de experimentos em modelos reduzidos. E por último é feita a revisão do método de injeção de nata de cimento mais consolidado atualmente: *jet grouting*.

No capítulo seis é apresentado o desenvolvimento da metodologia de ensaio, já que este tipo de experimento não havia sido executado anteriormente a este trabalho, bem como todos os elementos preponderantes para a execução dos mesmos.

No capítulo sete é feita a apresentação e a análise dos resultados obtidos da execução dos ensaios. Finalmente no capítulo oito são apresentadas as conclusões da pesquisa.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Neste capítulo, são apresentadas as diretrizes da pesquisa deste trabalho, com definição da questão de pesquisa, objetivos da pesquisa, hipótese, pressuposto, premissa, delimitações, limitações e delineamento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa que norteou este trabalho foi: qual a influência das variáveis de injeção na forma geométrica tomada pela nata de cimento, solidária à haste de injeção, injetada em solo argiloso saturado?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos itens seguintes.

2.2.1 Objetivo Principal

O principal objetivo deste trabalho é a verificação da influência das variáveis de injeção estudadas (velocidade de saída do jato, número e diâmetro dos furos de injeção) na forma geométrica, solidária à haste de injeção, tomada pela nata de cimento após sua injeção em solo argiloso saturado.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário deste trabalho é o desenvolvimento dos métodos de ensaio para a avaliação do comportamento da nata de cimento injetada no solo argiloso, englobando processos, equipamentos e materiais utilizados.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que quanto maiores a velocidade de saída e o número de furos de injeção do jato, menor é a tendência de formação de um elemento contínuo (bulbo) solidário à haste, que representa a estaca.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que estudos de reforço de solos com a injeção de agente cimentante associado à fluidização possam ser aplicados na engenharia de fundações para o aumento da capacidade de carga de estacas torpedo.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o mau desempenho de estacas torpedo, em determinadas condições, levou à necessidade de aprimorar esta tecnologia com outras técnicas, sendo uma delas o reforço do solo adjacente à estaca com a injeção de agente cimentante.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a injeção de nata de cimento em solo argiloso saturado simulando o reforço da capacidade portante de estacas torpedo.

2.7 LIMITAÇÕES

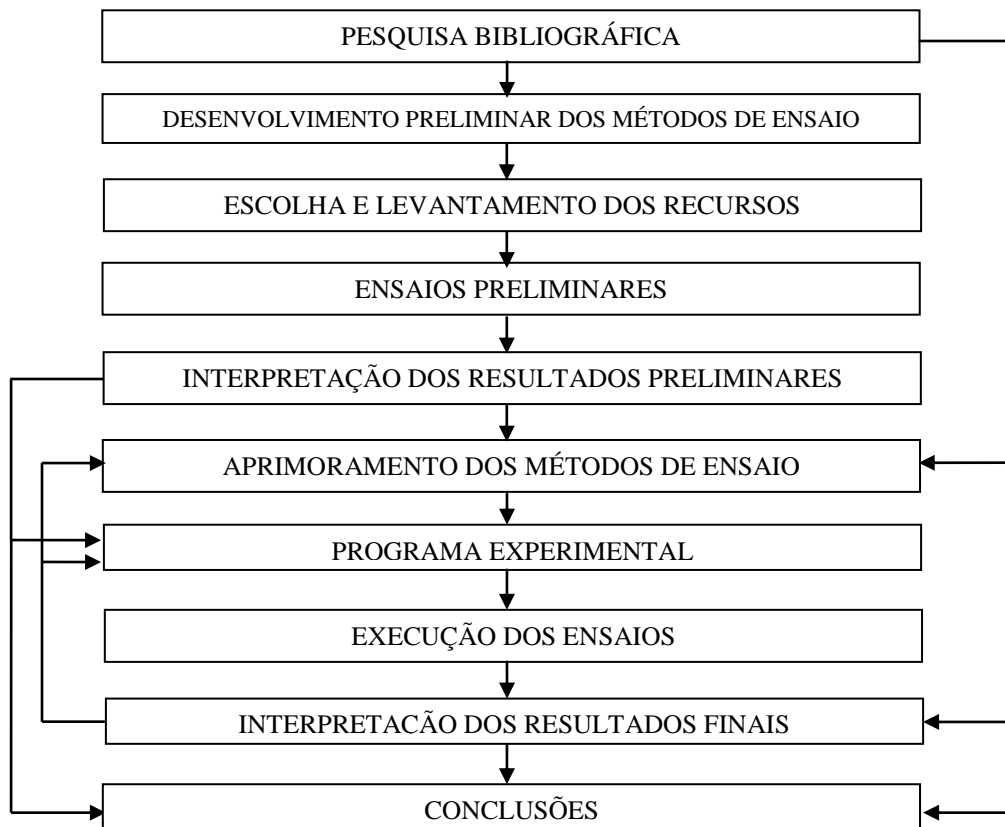
O trabalho limita-se a ser um estudo em modelo reduzido em laboratório. Em que as variáveis estudadas são: velocidade de saída do jato, número e diâmetro dos furos de injeção. A estaca torpedo é simulada pela haste de injeção. O trabalho está limitado também a ser feito em apenas um tipo de mistura de argilas, feita em laboratório.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas no próximo parágrafo:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) desenvolvimento da metodologia preliminar dos ensaios;
- c) escolha e levantamento dos recursos;
- d) ensaios preliminares;
- e) interpretação dos resultados preliminares;
- f) aprimoramento da metodologia dos ensaios;
- g) programa de ensaios;
- h) execução do programa de ensaios;
- i) interpretação dos resultados finais;
- j) conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

Na pesquisa bibliográfica foram coletadas informações necessárias para criar uma base teórica sobre os assuntos relacionados com o trabalho, por isso ela tem ligação com várias etapas da pesquisa (ver figura 1). Nela foram abordados os principais tipos de estruturas flutuantes *offshore* e seus tipos de ancoragem, similaridade de modelos reduzidos e a interação entre agente cimentante e o solo através de estudos de *jet grouting*. Após, foi feito o

desenvolvimento preliminar dos métodos de ensaio, quando foram estabelecidos todos os processos relacionados ao ensaio, quando então foram levantados os recursos necessários. Assim foi possível a execução dos ensaios preliminares para servirem de suporte, através da interpretação dos resultados preliminares, ao aprimoramento dos métodos de ensaio a serem utilizados na pesquisa, os quais também podem ser revistos de acordo com os resultados finais dos experimentos.

Com a metodologia considerada adequada, o programa de ensaios foi elaborado, para depois ser executado. O programa de ensaios também foi influenciado pela interpretação dos resultados preliminares e finais, sendo eventualmente acrescentado ou suprimido algum ensaio. Por fim, foram feitas as conclusões, que foram desenvolvidas à luz da pesquisa bibliográfica e da interpretação dos resultados, tanto preliminares como finais.

3 ÂNCORAGEM DE ESTRUTURAS FLUTUANTES

Neste capítulo é feita a apresentação, através de consulta à bibliografia publicada, das principais formas de ancoragem de estruturas flutuantes *offshore* utilizadas atualmente. O presente trabalho busca uma forma de melhorar o desempenho de uma dessas formas de ancoragem, por isso são abordadas características das mesmas, a fim da melhor compreensão de como é seu princípio de funcionamento.

É de grande importância saber, também, como são os tipos mais consolidados dessas estruturas flutuantes e como ocorre a ligação da estrutura com a âncora. Esses fatores influenciam diretamente como as estacas respondem às solicitações.

3.1 PLATAFORMAS FLUTUANTES

O desenvolvimento de plataformas de exploração em locais com mais de 400 m de lâmina d'água levou a inovações no projeto de estruturas *offshore*. Primeiramente porque, a esta profundidade, a frequência natural de plataformas fixas se aproxima da frequência dominante das ondas, criando uma condição de ressonância. Como resultado, criaram-se novas estruturas que têm frequências naturais muito menores que as das ondas oceânicas (SHARMA, 2004, p. 3).

Os principais tipos de plataformas flutuantes são:

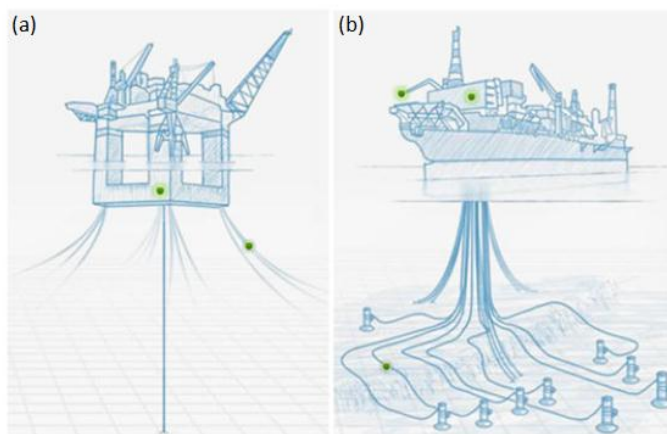
- a) semissubmersíveis (*floating production system* ou FPS),
- b) de pernas atirantadas (*tensions leg platforms* ou TLP),
- c) SPAR.

3.1.1 Plataformas semissubmersíveis (FPS)

As plataformas semissubmersíveis (FPS) são grandes corpos flutuantes ancorados ao leito marítimo que produzem, estocam e descarregam o petróleo extraído (SHARMA, 2004, p. 5). Quando são baseadas em navios petroleiros, são chamadas de FPSOs (*Floating, Production, Storage and Offloading systems*). Podem consistir tanto em petroleiros adaptados para a

função, como estruturas concebidas para esse propósito. São muito populares no Brasil, no Mar do Norte e na costa oeste da África (AUBENY et al., 2001, p. 233). A figura 2 mostra uma ilustração das plataformas semissubmersíveis.

Figura 2 – Exemplos de estruturas *offshore* semissubmersíveis
(a) FPS e (b) FPSOs



(fonte: adaptado de PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2014)

3.1.2 Plataformas de pernas atirantadas (TLP)

As plataformas de pernas atirantadas (TLP) possuem estrutura semelhante às plataformas semissubmersíveis, porém são ligadas ao leito marítimo através de cabos verticais que estão sempre tensionados devido ao empuxo vertical da estrutura, mantendo-se sempre tensionados até mesmo nas situações extremas de carregamento. As fundações podem ser de estacas cilíndricas de grande diâmetro, que fornecem resistência às forças de arrancamento na vertical, ou de estacas de sucção (AUBENY et al., 2001, p. 233). O carregamento é predominantemente vertical, sendo que Aubeny et al. (2001, p. 233, tradução nossa) afirmam que: "[...] as forças horizontais são estimadas em menos de 10% das forças verticais.". A situação crítica normalmente ocorre quando uma mudança do nível do mar devido a tempestades acontece juntamente com uma grande solicitação das ondas (AUBENY et al., 2001, p. 233)

3.1.3 Plataformas SPAR

As plataformas tipo SPAR surgiram recentemente como uma alternativa para águas profundas entre aproximadamente 650 a 2000 m (AUBENY et al., 2001, p. 233). São apoiadas sobre um

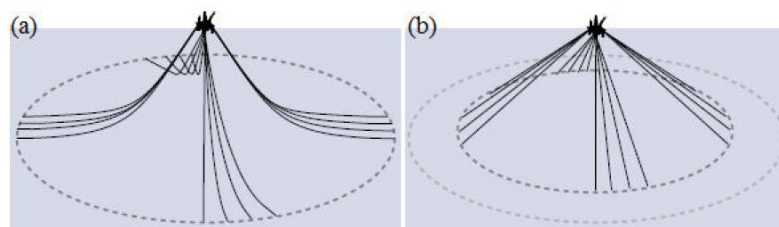
cilindro metálico oco que sustenta a plataforma através do empuxo vertical causado por sua fluutuabilidade (SHARMA, 2004, p. 6). O cilindro contém tanques leves na base e tanques pesados no topo para garantir sua estabilidade, que também é ajustado por lastros variáveis quando a plataforma é solicitada por carregamentos no topo. Como resultado, é muito estável, com períodos naturais muito maiores que os das ondas do mar, evitando o efeito de ressonância (AUBENY et al., 2001, p. 233).

3.2 TIPOS DE LINHAS DE ANCORAGEM

Outro fator que influencia o desempenho dos sistemas de ancoragem é a forma como acontece a disposição dos cabos que ligam a estrutura às âncoras. A configuração das linhas de amarração pode ser em catenária ou com cabos esticados (*taut legs*), conforme exemplificado na figura 3. No caso do sistema com cabos esticados, o carregamento que a estaca é submetida varia entre 30° e 60° em relação ao leito marítimo, fazendo com que ocorram esforços verticais e horizontais. Para o sistema em catenária o ângulo de carregamento varia de zero a 20° , causando predominantemente esforços horizontais. O ângulo de carregamento afeta significativamente a capacidade de solicitação mobilizada pela estaca (SHARMA, 2004, p. 12).

Aubeny et al. (2001, p. 236) afirmam que, apesar de ser o mais utilizado, o sistema em catenária em águas ultraprofundas exige uma área maior para sua instalação, uma vez que seu raio de instalação é mais elevado. Sendo assim sistemas em cabos esticados são mais atrativos por evitar a interferência de linhas de amarração e dutos entre as plataformas.

Figura 3 – Configurações de linhas de ancoragem
(a) sistema em catenária e (b) sistema de cabos esticados

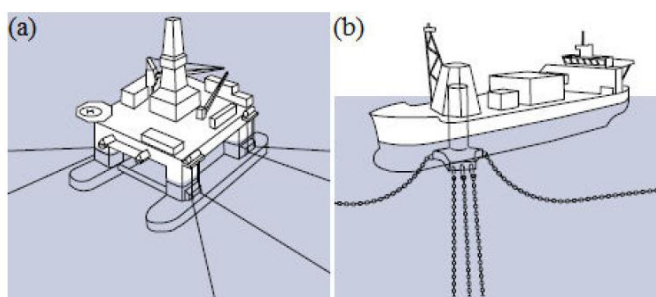


(fonte: adaptado de VRYHOF ANCHORS B.V, 2010, p. 7)

Há ainda a diferença entre como se dá a ligação entre a linha de ancoragem e a estrutura. O manual de âncoras da Vryhof Anchor (VRYHOF ANCHORS B.V., 2010, p. 6) lista tipos

dessas ligações, e destaca os sistemas de ligação semissubmersível (*semi-submersible mooring*), no qual as linhas se ligam às extremidades da estrutura, e o sistema de ligação em torre (*turret mooring*), em que as linhas são ligadas a uma torre (figura 4). Nesse sistema a estrutura é capaz de girar em torno dessa torre para obter uma adequada orientação em relação às solicitações e correntes marítimas. Esse último tipo é comum em plataformas do tipo FPS e FPSOs em ambientes severos.

Figura 4 – Tipos de ligação entre a estrutura flutuante e as linhas de ancoragem (a) linhas ligadas às extremidades da estrutura e (b) linhas ligadas à torre giratória



(fonte: adaptado de VRYHOF ANCHORS B. V., 2010, p. 6)

3.3 TIPOS DE ÂNCORAS

Devido ao grande desenvolvimento da indústria do petróleo *offshore* nos últimos 20 anos, a literatura apresenta um vasto número de âncoras e estacas para a fixação de estruturas em águas profundas e ultraprofundas. Os tipos mais comuns de âncoras atualmente são:

- a) de sucção;
- b) de arraste;
- c) SEPLA;
- d) estacas torpedo.

3.3.1 Âncoras de sucção

Âncoras ou estacas de sucção (*suction cassions*) são cilindros ocos abertos na extremidade inferior e fechados na superior, exemplificados na figura 5. A penetração no leito marítimo é feita primeiramente pelo peso próprio, após, é aplicada uma pressão diferencial causada pelo bombeamento da água para fora do cilindro, causando uma força que penetra a âncora no solo. Sua razão comprimento/raio varia de 1,5 a 5 (AUBENY et al., 2001, p. 236).

Sharma (2004, p. 12) afirma que o ponto de ligação entre a estaca e a linha de amarração influencia o desempenho da estaca. Segundo ele, quando o carregamento é aplicado próximo a superfície do solo, a estaca tende a rotacionar. Já quando o ponto de ligação se aproxima da base, a tendência à rotação diminui, e a estaca tende a transladar.

Com carregamentos horizontais a âncora tende a se comportar como uma estaca qualquer com solicitações horizontais. Em situações de carregamento vertical, as resistências são desenvolvidas por atrito lateral e por sucção, causada pela pressão diferencial entre o topo da estaca e a água (uma força denominada resistência de ponta invertida) (AUBENY et al., 2001, p. 236).

Figura 5 – Âncoras de sucção



(fonte: DELMAR SYSTEMS, INC., 2014)

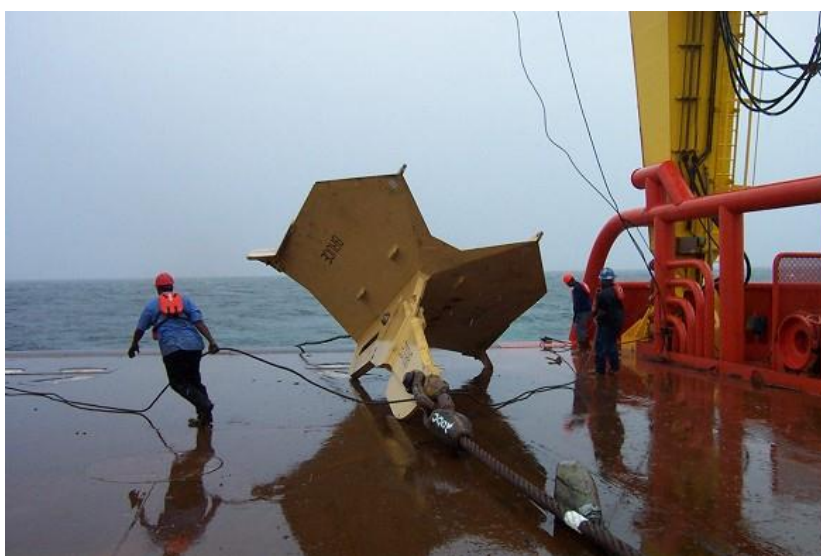
3.3.2 Âncoras de arraste (VLA ou *drag embedment anchors*)

São estacas com formato muito semelhante ao de uma âncora (figura 6), as quais são instaladas por arraste no leito oceânico, através de cabos, desenvolvendo resistência pelo solo mobilizado e pela penetração causados pelo arraste. Uma questão fundamental é a incerteza quanto à trajetória da âncora durante sua instalação (AUBENY et al., 2001, p. 236).

O Vryhof Anchors B.V. (2010, p. 41) explica que as *drag embedment anchors* vão penetrar no leito marítimo percorrendo uma determinada distância chamada de comprimento de arrasto. Ela é então capaz de suportar uma força igual àquela aplicada no momento da instalação. Porém quando a força de instalação é excedida, a âncora continua a se arrastar até que o solo mobilizado seja capaz de prover a resistência necessária.

O Vryhof Anchors B.V. (2010, p. 42) afirma que as âncoras VLA (*vertical loading anchor*) tem o mesmo princípio de funcionamento do sistema do parágrafo anterior. Porém, durante sua instalação a âncora é posicionada em uma determinada posição e o carregamento é feito com um ângulo em relação à base da âncora. Segundo o mesmo Manual, "Essa mudança na direção do carregamento gera de 2,5 a 3 vezes mais capacidade de carga em relação ao carregamento de instalação.". O carregamento de solicitação pode ser aplicado em qualquer direção, incluindo na vertical (VRYHOF ANCHORS B.V., 2010, p. 42, tradução nossa).

Figura 6 – Âncora de arraste



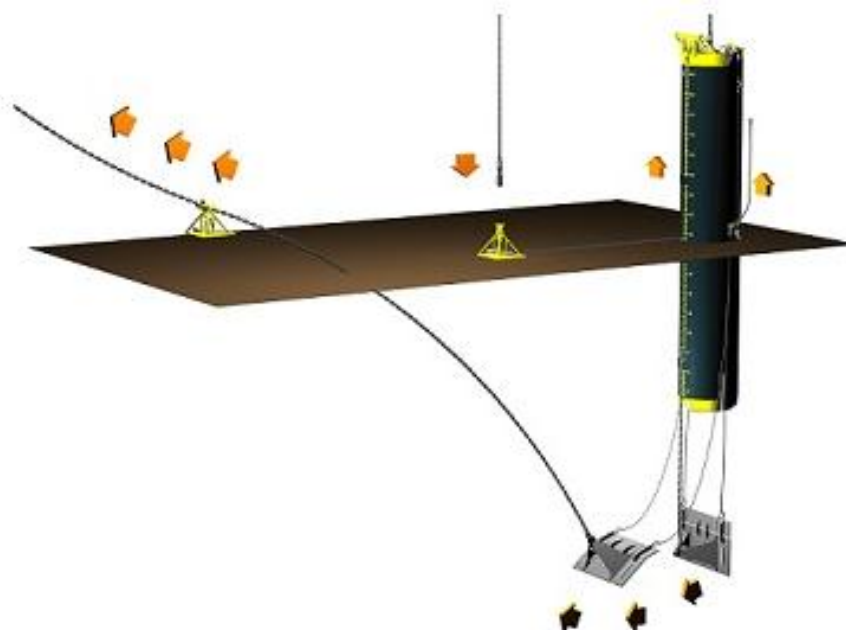
(fonte: THE BRUCE ANCHOR GROUP, 2014)

3.3.3 Âncoras SEPLA (*suction embedment plate anchor*)

É uma placa orientada na posição vertical instalada a uma dada profundidade através de uma estaca de sucção, a qual é removida após a placa ser instalada. Após esta remoção a placa é rotacionada para uma posição inclinada (SHARMA, 2004, p. 10). É um sistema que foi patenteado pela empresa InterMoor em 1997 (STRACKE, 2012, p. 32). A figura 7 mostra o processo de instalação descrito neste parágrafo.

Segundo Aubeny et al. (2001, p. 240), com este sistema há uma maior precisão na posição da âncora, eliminando as incertezas dos sistemas embutidos. De acordo com o autor, são estacas mais econômicas se comparadas às de sucção, pois a estaca de sucção que é usada para a instalação é recuperada e pode ser reutilizada.

Figura 7 – Fases de instalação e rotação da placa da âncora tipo SEPLA



(fonte: INTERMOOR, 2014)

3.3.4 Estacas torpedo

Devido aos elevados custos associados aos sistemas de ancoragem mencionados anteriormente, a Petrobras desenvolve desde 1996 a tecnologia de estacas instaladas por queda livre, sendo usadas para ancorar *risers* flexíveis (condutores de fluidos apoiados no fundo do mar que vão até uma unidade flutuante de produção), boias marítimas e estruturas flutuantes, tanto em solos calcáreos como em solos coesivos.

Âncora torpedo é uma estaca tubular, em forma de um torpedo, instalada pela energia gerada por queda livre (figura 8). Pode apresentar aletas (quilhas), ser preenchida com material inerte (entulho ou concreto) para garantir maior peso à estaca, e normalmente tem ponta cônica (MEDEIROS JR., 2001). Quanto ao formato e ao peso, Brum Jr. et al. (2010, p. 2) dividem a âncora em três principais partes: a ponta, o fuste e as aletas (ou quilhas). Sendo assim, continua o autor, a estaca deve ter o peso bem balanceado, ou seja, deve manter o centro de gravidade o mais perto da ponta possível, porém longe do centro de pressões. Esta configuração permite que o torpedo mergulhe na posição vertical, e em caso de desvios devido às pressões diferenciais no torpedo, o mesmo pode retornar à posição vertical por si só.

Este tipo de ancoramento é vantajoso porque, além de precisar de pouca mobilização para sua instalação se comparado com os métodos anteriores, não necessita de energia externa para sua

penetração, como no caso de bombas nas âncoras de sucção. Outra vantagem é que seu desempenho é menos sensível à acurácia na determinação dos perfis de resistência ao cisalhamento do subsolo marítimo. Isso porque resistências ao cisalhamento menores vão permitir uma penetração maior, e vice versa, com a capacidade de arrancamento sendo basicamente função da energia posta do sistema, ou seja, altura de queda do torpedo (O'LOUGHLIN et al., 2004, p. 2).

Outra vantagem das estacas torpedo é de serem menos sensíveis à altura da lâmina d'água se comparadas aos métodos convencionais de ancoramento de estruturas *offshore*. Não há restrição quanto à profundidade de massa de água para esta aplicação (MEDEIROS JR., 2001, [p. 6]).

A análise do embutimento é um importante parâmetro deste tipo de estaca. Medeiros Jr. (2001, [p. 3], tradução nossa) afirma que: "Os principais parâmetros que governam essa análise são: a velocidade de impacto no leito marítimo, a massa e a geometria da estaca, e as características do solo, principalmente a resistência ao cisalhamento e a sensibilidade."

Medeiros Jr. (2001, [p. 6]) registrou que o uso, na Bacia de Campos, de âncoras torpedo em *risers* flexíveis reduziu significativamente o comprimento das linhas de *risers*, uma vez que, sem o ancoramento, os carregamentos dos dutos têm que ser absorvidos pelo atrito entre o solo e o duto. Em um ano e meio, mais de 60 torpedos foram instalados para ancorar *risers*, resultando em uma economia de 200 km de dutos, cerca de 30% do total instalado.

Figura 8 – Estacas torpedo utilizadas pela Petrobras



(fonte: BRUM JR. et al., 2010, p. 2)

3.3.4.1 Instalação de estacas torpedo

Para a instalação é apenas necessária uma embarcação. Os processos de instalação são os seguintes (MEDEIROS JR., 2001):

- a) a embarcação de apoio põe o torpedo na água, preso por uma linha de lançamento;
- b) ele é então posicionado na altura de queda pré-determinada em projeto;
- c) a linha de lançamento é então liberada, porém o torpedo continua parado devido à extremidade presa ao mesmo estar trancada. Isto é feito de modo a liberar a linha de lançamento suficientemente para o torpedo alcançar a profundidade desejada;
- d) após ser liberado o comprimento de linha de lançamento suficiente, a extremidade da linha presa à embarcação é também trancada;
- e) a altura de queda é então conferida;
- f) o torpedo é liberado;
- g) após a penetração é feita a ligação do torpedo à estrutura que ele irá ancorar, utilizando ou não a própria linha de lançamento.

3.3.4.2 Resultados de testes com estacas torpedo

Medeiros Jr. (2001) realizou testes em campo com os seguintes tipos de torpedo:

- a) 76 cm de diâmetro, 12 m de comprimento, 240 kN de peso seco;
- b) 106,5 cm de diâmetro, 12 m de comprimento e 620 kN de peso seco.

Para os testes com os torpedos de 76 cm de diâmetro, com queda de altura média de 30 m chegou a uma capacidade ao arrancamento com carregamento na horizontal (para simular os carregamentos em *risers*) variando de 900 kN a 1100 kN. Dez dias após registrou uma capacidade máxima de 1700 kN a 2200 kN. Já para os torpedos de 106,5 cm de diâmetro foram aplicados carregamentos formando 45° com a horizontal. Desta maneira, o autor chegou a capacidades ao arrancamento máximas de 1900 kN a 2100 kN. Após 18 dias de cura esses mesmos torpedos registraram uma capacidade média ao arrancamento de 3950 kN.

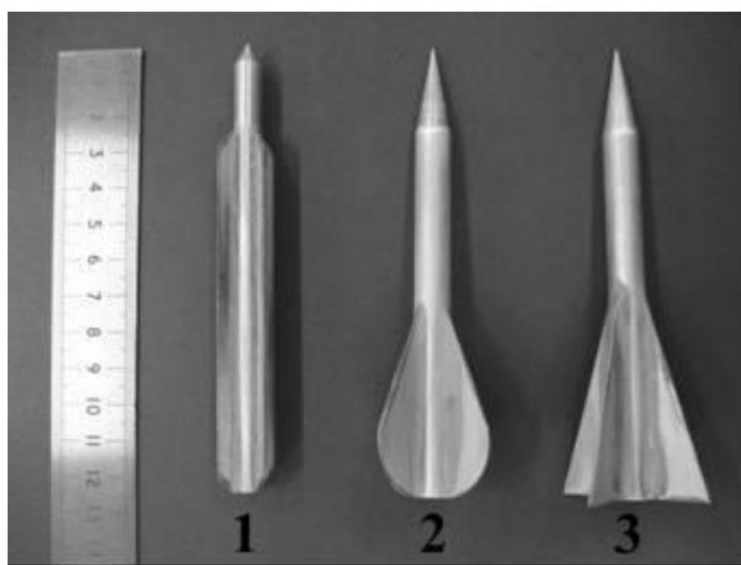
O'Loughlin et al. (2004, p. 4, tradução nossa), que realizaram testes de modelos reduzidos de diferentes estacas torpedo, comparam seus resultados aos do parágrafo anterior e afirmam que: "Os dados normalizados do teste em centrífuga indicam essencialmente uma variação da capacidade [ao arrancamento] similar [...]".

Medeiros Jr. (2001) também analisou, para os torpedos das alíneas anteriores com altura de queda média de 30 m, a profundidade de embutimento medida sempre a partir da ponta do cone. Para os torpedos de 76 cm de diâmetros, chegou a um embutimento médio de 20 m. Já para os de 106,5 mediu uma penetração média de 29 m. No mesmo trabalho o autor verificou a influência do tipo de solo na penetração das estacas, chegando as seguintes profundidades médias de penetração:

- a) 29 m em argila normalmente adensada;
- b) 13,5 m em argila pré-adensada;
- c) 15 m em areia calcárea não cimentada;
- d) 22 m em um solo com os 13 m de areia fina, seguidos de argila normalmente adensada.

Brum Jr. et al. (2010, p. 6) chegaram a algumas conclusões sobre o formato e o peso de diferentes estacas torpedo em um estudo em modelos reduzidos em centrífuga. Em suas conclusões, o autor afirma que o torpedo 3 (ver figura 9) apresentou melhor performance hidrodinâmica e de capacidade de carga, se comparado com os outros dois. A influência das aletas (quilhas) pôde ser observada na capacidade de carga ao comparar o torpedo 2 e 3, já que ambos têm o mesmo peso e a mesma área lateral, diferindo apenas no formato.

Figura 9 – Diferentes formas de estacas torpedo ensaiadas



(fonte: BRUM JR. et al., 2010, p. 2)

4 SEMELHANÇA DE MODELOS REDUZIDOS

Muitas vezes a realização de experimentos em escala real é dispendiosa e, eventualmente, inviável tecnicamente na área geotécnica. Sendo assim, opta-se pelo estudo em laboratório de modelos reduzidos, que representam em escala um determinado protótipo.

Estudos geotécnicos que fazem uso de modelos reduzidos devem ser sempre conduzidos com hipóteses claras a respeito das leis de semelhança que os conectam com o fenômeno em escala real, porém nem sempre se observa esta prática. Modelos reduzidos são instrumentos de medição indireta, portanto devem sempre ser relacionados aos modelos em escala real, o que resultaria na equivalência da medição *in situ* do fenômeno físico em questão¹.

Carneiro (1993, p. 4) então afirma que "Uma das principais aplicações da análise dimensional é o estabelecimento das condições de semelhança física que deve relacionar os protótipos com os modelos utilizados nas experiências.". Portanto usa-se a análise dimensional para fazer a ligação entre modelos.

É essencial que se estabeleça quais grandezas físicas podem ou não ser controladas, e quais grandezas são ou não relevantes ao fenômeno estudado, pois a lei de semelhança obtida da análise dimensional depende de quais grandezas estão em questão no experimento. Com esta escolha chega-se a lei de semelhança mais apropriada.

Na geotecnia, das chamadas grandezas fundamentais do sistema de unidades, são relevantes aos fenômenos mecânicos apenas três: o comprimento, a massa e o tempo². Por consequência, conforme Carneiro (1993), isso implica que apenas três grandezas de base podem ter suas escalas pré-estabelecidas, a partir das quais as escalas de todas as outras grandezas são decorrentes.

Este capítulo faz uma revisão sobre as relações entre modelos reduzidos e protótipos para estudos de fenômenos geotécnicos que envolvam a ruptura do solo. Abordam-se também as

¹ Material não publicado até a data de finalização deste trabalho. Trata-se de um relatório da pesquisa, desenvolvida pela UFRGS em parceria com a Petrobras, intitulada: "Sistemas de Jateamento, Transferência de Carga e Melhoramentos de Solo". Este relatório tem como autores os professores Marcelo M. Rocha, Fernando Schnaid e Nilo Consoli, todos do quadro de professores da UFRGS.

² Idem

considerações especiais em relação aos solos argilosos, que demonstram ter a necessidade de substituição do material original por um material equivalente em escala, com propriedades modificadas.

4.1 CÁLCULO DE ESCALA DE GRANDEZAS DERIVADAS

O cálculo de grandezas derivadas é análogo ao cálculo de troca de unidades. Começa com a substituição das três grandezas fundamentais (comprimento, L , massa, M e tempo, T) por três grandezas de base, que por sua vez são escolhidas conforme o fenômeno a ser modelado (CARNEIRO, 1993, p. 9-10).

Define-se uma nova base composta pelas grandezas A , B e C (grandezas de base). Assim, as escalas das novas grandezas de base podem ser escritas em função das escalas das grandezas fundamentais como (CARNEIRO, 1993, p. 30-31):

$$\begin{aligned} A &= L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T} \\ B &= L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T} \\ C &= L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T} \end{aligned} \quad (\text{equações 1})$$

Onde:

A , B e C = escalas das grandezas de base;

L , M e T = grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo, respectivamente);

n_L , n_M e n_T = expoentes dimensionais das grandezas fundamentais nas grandezas de base.

Conforme o mesmo autor, os expoentes das grandezas fundamentais são chamados expoentes dimensionais, e constituem a chamada matriz dimensional da base:

$$D = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

D = matriz dimensional da base.

Carneiro (1993, p. 30) alerta que para a substituição de grandezas ser válida, é indispensável que cada linha não seja uma combinação linear das demais. Por exemplo, comprimento, área e

volume não poderiam constituir uma nova base, pois seus expoentes dimensionais são vetores linearmente dependentes.

Tomando-se agora o logaritmo de todos os termos, tem-se:

$$\begin{aligned} \log A &= \log(L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T}) = a_L \log L + a_M \log M + a_T \log T \\ \log B &= \log(L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T}) = b_L \log L + b_M \log M + b_T \log T \\ \log C &= \log(L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T}) = c_L \log L + c_M \log M + c_T \log T \end{aligned} \quad (\text{equações 3})$$

As equações 3 podem ser colocadas em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

A, B e C = escalas das grandezas de base;

L, M e T = grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo, respectivamente);

n_L, n_M e n_T = expoentes dimensionais das grandezas fundamentais nas grandezas de base.

Esta relação pode ser invertida. Para isso é necessária a inversão da matriz dimensional. Daí a necessidade de que suas linhas sejam linearmente independentes, do contrário a matriz seria singular:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_A & b_A & c_A \\ b_A & b_B & c_B \\ c_A & c_B & c_C \end{bmatrix} \quad (\text{equação 5})$$

$$\begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

A, B e C = escalas das grandezas de base;

L, M e T = grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo, respectivamente);

n_L, n_M e n_T = expoentes dimensionais das grandezas fundamentais nas grandezas de base;

n_A, n_B e n_C = elementos da matriz dimensional invertida da nova base.

Substituindo-se a equação 5 nas equações 6, e retornando-se à forma polinomial, tem-se:

$$\begin{aligned} \log L &= \log A^{a_A} + \log B^{a_B} + \log C^{a_C} = \log(A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C}) \\ \log M &= \log A^{b_A} + \log B^{b_B} + \log C^{b_C} = \log(A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C}) \\ \log T &= \log A^{c_A} + \log B^{c_B} + \log C^{c_C} = \log(A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C}) \end{aligned} \quad (\text{equações 7})$$

Com isso retorna-se às grandezas fundamentais calculadas a partir das novas grandezas de base:

$$\begin{aligned} L &= A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C} \\ M &= A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C} \\ T &= A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C} \end{aligned} \quad (\text{equações 8})$$

Onde:

L, M e T = grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo, respectivamente);

A, B e C = escalas das grandezas de base;

n_A, n_B e n_C = elementos da matriz dimensional invertida da nova base.

Com esse resultado, pode-se agora calcular qualquer escala de grandeza derivada em relação às escalas das novas grandezas de base.

De forma genérica, dada uma grandeza X cuja unidade tenha expoentes dimensionais α, β e γ em relação às grandezas fundamentais (CARNEIRO, 1993, p. 31-33):

$$X = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

X = escala da grandeza derivada;

L, M e T = grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo, respectivamente);

α, β e γ = expoentes dimensionais da grandeza derivada.

Substituindo-se as equações 8 na equação 9 tem-se:

$$X = (A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C})^\alpha (A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C})^\beta (A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C})^\gamma \quad (\text{equação 10})$$

Fatorando-se as bases, chega-se finalmente a:

$$X = A^{(\alpha a_A + \beta b_C + \gamma c_A)} B^{(\alpha a_A + \beta b_C + \gamma c_A)} C^{(\alpha a_A + \beta b_C + \gamma c_A)} \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

X = escala da grandeza derivada;

A , B e C = escalas das grandezas de base;

n_A , n_B e n_C = elementos da matriz dimensional invertida da nova base;

α , β e γ = expoentes dimensionais da grandeza derivada.

A equação 11 representa uma fórmula geral para o cálculo da escala de qualquer grandeza derivada, a qual faz uso da inversa da matriz dimensional do novo conjunto de grandezas de base escolhidas. Isso pode ser programado em planilhas eletrônicas para o estabelecimento de relações entre diversas grandezas.

4.2 CÁLCULO DE ESCALA DE GRANDEZAS DERIVADAS PARA FENÔMENOS GEOTÉCNICOS

Neste item é apresentada a determinação das escalas das grandezas derivadas para um fenômeno geotécnico de ruptura do solo, no qual as grandezas fundamentais relevantes são comprimento, massa e tempo.

As grandezas de base são escolhidas de acordo com o tipo do experimento e com os mecanismos relevantes ao problema. Situações de ruptura do solo são ligadas à tensão vertical no maciço, sendo assim as grandezas de base escolhidas vêm da equação da tensão vertical total no solo:

$$\sigma_v = \rho \times g \times z \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

σ_v = tensão vertical total (N/m²);

ρ = massa específica do solo (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

z = profundidade medida a partir da superfície do solo (m).

Então para este tipo de análise se estabelece um sistema de grandezas de base constituído de:

- a) comprimento (L), escala livre, pois as medidas dos elementos do experimento (geometria, área de influência, etc.) diferem do modelo real;
- b) massa específica (ρ), escala fixa, pois utiliza-se o material com as mesmas características do modelo real;
- c) aceleração (g), escala fixa, pois a gravidade é a mesma do modelo real, ou seja, a da terra.

Estabelecidas as grandezas de base, aplica-se o desenvolvimento do item anterior. Com o auxílio de uma planilha eletrônica desenvolvida pelo professor Marcelo M. Rocha da UFRGS, chega-se ao resultado expresso na tabela 1.

Destacado na tabela 1 está a grandeza derivada tensão. Observa-se assim que a tensão tem a mesma escala do experimento, logo há a necessidade de ser usado no experimento um material com sua coesão (medida de tensão) reduzida na mesma proporção do comprimento, mantendo-se a mesma massa específica.

Tabela 1 – Exemplo de planilha eletrônica para o cálculo da escala de grandezas derivadas das grandezas de base

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	\mathcal{L}	\mathcal{M}	\mathcal{T}	Inversão			Escala	Escala Inv.
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	1	0	0	2,000E-02	50
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	3	1	0	1,000E+00	1
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	0,5	0	-0,5	1,000E+00	1
Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	\mathcal{L}	m	t	\mathcal{L}	ρ	g	Escala	Escala Inv.
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	1	0	0	2,000E-02	50
Massa	\mathcal{M}	kg	0	1	0	3	1	0	8,000E-06	125000
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	0	0	1	1,000E+00	1
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0,5	0	0,5	1,414E-01	7,07
Vazão	Q	m ³ /s	3	0	-1	2,5	0	0,5	5,657E-05	17678
Força	F	N	1	1	-2	3	1	1	8,000E-06	125000
Momento	\mathcal{M}	Nm	2	1	-2	4	1	1	1,600E-07	6250000
Rigidez axial	k_c	N/m	0	1	-2	2	1	1	4,000E-04	2500
Tensão (pressão, módulos, coesão, etc.)	σ	Pa	-1	1	-2	1	1	1	2,000E-02	50
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	0	1	0	1,000E+00	1
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	2	0	0	4,000E-04	2500
Volume	\mathcal{V}	m ³	3	0	0	3	0	0	8,000E-06	125000

(fonte: trabalho não publicado³)

4.3 CONSIDERAÇÕES DE MATERIAIS EQUIVALENTES EM ARGILAS

Argilas têm sua resistência à ruptura dependente de sua coesão (unidade de tensão), e, de acordo com a conclusão do último parágrafo do item anterior, há necessidade de um material equivalente. Assim, faz-se necessário o uso, não do solo original, mas sim de um solo equivalente em escala com a coesão reduzida⁴.

Na mesma linha de pesquisa desenvolvida pela UFRGS, em parceria com a Petrobras (indicada na introdução), a qual este trabalho faz parte, Jung (2012) elaborou um trabalho de fluidização de solos argilosos para a ancoragem de estruturas flutuantes. Neste trabalho o autor usou um solo argiloso com mistura de caulim (coesão quase nula) e bentonita, com o objetivo de manter as relações de escala. O autor usou a mesma escala de comprimento que este trabalho utiliza.

Jung (2012, p. 46-49) propôs então a dosagem em massa de materiais secos de 80% de caulim e 20% de bentonita, para o solo argiloso representativo do solo marítimo da região da Bacia

³ Planilha desenvolvida pelo professor da UFRGS Marcelo M. Rocha e disponibilizada pelo mesmo em sua disciplina ENG01022 — Técnicas experimentais aplicadas a vibrações em estruturas.

⁴ Material não publicado até a data de finalização deste trabalho. Trata-se de um relatório da pesquisa, desenvolvida pela UFRGS em parceria com a Petrobras, intitulada: "Sistemas de Jateamento, Transferência de Carga e Melhoramentos de Solo". Este relatório tem como autores os professores Marcelo M. Rocha, Fernando Schnaid e Nilo Consoli, todos do quadro de professores da UFRGS.

de Campos (onde se encontram as principais plataformas marítimas brasileiras). Além disso, simulou um teor de umidade de 120%, também representativo do leito oceânico. A tabela 2 apresenta as propriedades da mistura em questão.

Tabela 2 – Propriedades da mistura argilosa

Índice de vazios	3,22
Teor de umidade (%)	120
Peso específico aparente umido (kN/m ³)	13,71
Resistência ao cisalhamento não drenada (kPa)	0,10
S_u/σ'_{v0}	0,34

(fonte: adaptado de JUNG, 2012, p. 49)

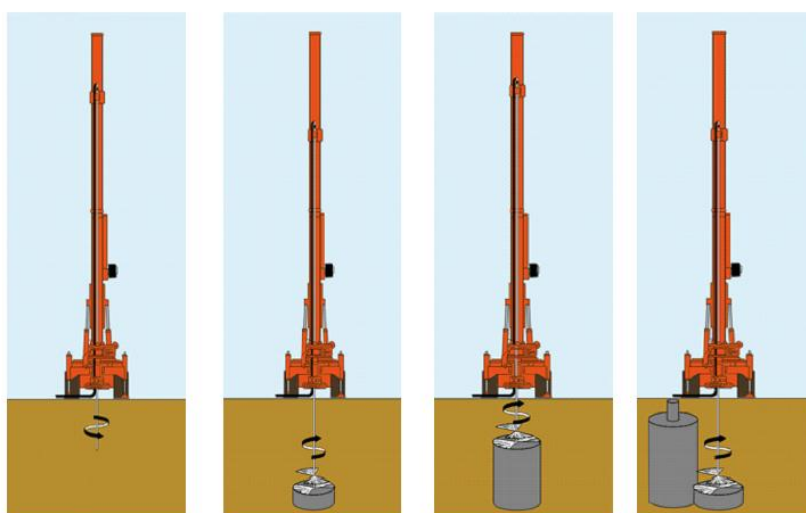
5 INTERAÇÃO ENTRE O SOLO E O JATO DE NATA DE CIMENTO

Entender como funciona a interação entre o jato de nata de cimento e o solo é importante para ser possível avaliar mecanismos de erosão ou ruptura hidráulica que possam vir a ocorrer no momento da injeção da nata. Para isso este capítulo faz uma revisão de como ocorre essa interação através de estudos do método de *jet grouting*, fazendo a ressalva que a grandeza da velocidade de saída do jato é muito maior nesta técnica.

5.1 O SISTEMA *JET GROUTING*

O *jet grouting* é uma técnica de tratamento de solos em que um jato de um fluido cimentante (geralmente calda de cimento) é aplicado no solo a alta velocidade por meio de bicos de pequeno diâmetro (aproximadamente 3 mm) dispostos lateralmente na extremidade de uma haste. A haste é extraída do terreno por movimento vertical e rotacional, originando corpos de solo cimento, com formato aproximadamente cilíndrico, denominadas colunas de *jet grouting* (CARLETTO, 2009, p. 5). A figura 10 exemplifica esse processo.

Figura 10 – Etapas de instalação do sistema *jet grouting*



(fonte: MODONI et al.⁵, 2006 apud CARLETTO, 2009, p. 5)

⁵ MODONI, G.; CROCE, P.; MONGIOVÌ, L. Theoretical modeling of jet grouting. **Géotechnique**, London, v. 56, n. 5, p. 335-47, 2006.

A alta pressão, com a qual a nata é bombeada (até 550 vezes a pressão atmosférica), confere ao fluido uma grande energia de natureza potencial, que se transforma em energia cinética tão logo a calda atravessa os bicos. Em geral, a velocidade com que a nata sai dos orifícios atinge valores entre 200 e 400 m/s (CARLETTO, 2009, p. 5).

O *jet grouting* é denominado uma técnica hidrodinâmica que promove a mistura da calda de cimento com o solo *in situ* visando a produção de um novo material. Além disso, em contraposição às técnicas tradicionais de injeção de solos, com o *jet grouting* podem ser aplicados volumes de tratamento muito reduzidos com o controle da quantidade de aglomerante utilizada (CARLETTO, 2009, p. 5-6).

Carletto (2009, p. 8) indica que "O *jet grouting* aplica-se, em princípio, a qualquer tipo de solo, sem restrições granulométricas, geológicas ou de presença de água. As colunas podem ser executadas a partir da superfície do terreno, na direção vertical ou inclinada [...]". O mesmo autor ainda afirma que outra "[...] aplicação clássica do *jet grouting* refere-se à execução de barreiras impermeáveis." (CARLETTO, 2009, p. 9). Sendo possível fazer com que as estacas se sobreponham com perfeita adesão no contato entre as colunas.

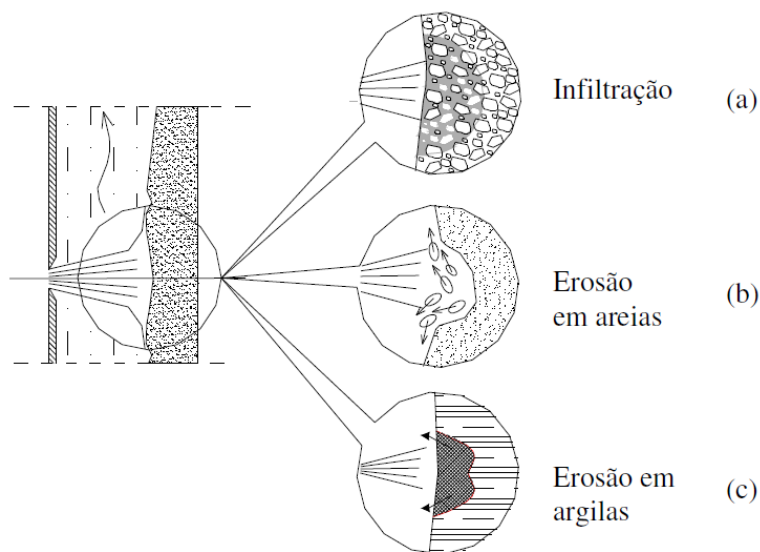
Dentre as outras aplicações deste método, Carletto (2009, p. 10) destaca:

- a) estabilização temporária de túneis por meio de colunas subverticais;
- b) paredes de contenção;
- c) formação de cortinas de vedação em barragens;
- e) reforço de fundações;
- f) execução de conjuntos de colunas em aterros sobre solos moles, com a finalidade de receber o carregamento e de transmiti-lo à camada portante subjacente;
- g) estabilização de taludes contra escorregamentos.

5.2 INTERAÇÃO ENTRE A CALDA DE CIMENTO INJETADA E O SOLO

Carletto (2009, p. 26) afirma que o modelo de Modoni propõe formas de interação entre um jato de calda de cimento, injetado a grandes velocidades, e solos com diferentes tipos de granulometria (figura 11).

Figura 11 – Mecanismos de interação entre jato de *jet grouting* e diferentes tipos de solo: (a) solo de granulometria muito grosseira, (b) solo arenoso e (c) solo argiloso



(fonte: MODONI et al.⁶, 2006 apud CARLETTO, 2009, p. 26)

Em solos de granulometria mais fina, como argilas, os espaços de vazios de ar entre os grãos são muito reduzidos, fazendo com que a resistência à percolação da nata de cimento seja mais elevada. Sendo assim, o jato tende a deslocar partículas ou grupo de partículas do solo, que podem ser arrastadas até a superfície do terreno, causando um fenômeno de erosão, que "[...] deve ser tratado levando-se em conta a natureza particulada do solo e a interação de cada partícula com a massa fluida." (CARLETTO, 2009, p. 27).

Segundo Carletto (2009, p. 27), "As experiências mostram que argilas (não necessariamente consistentes) possuem maior resistência à erosão do que as areias.". O mesmo autor ainda afirma que a comparação em resultados de *jet grouting* mostra que os diâmetros das colunas obtidas em solos argilosos são geralmente menores do que em solos com granulometrias maiores.

Devido à dimensão reduzida dos vazios de solos argilosos, os filetes de jato não penetram por percolação. A análise então deve ser feita em tensões totais, e o processo erosivo é descrito como várias rupturas não drenadas entre parcelas de argila, ou seja, admite-se que a ação do jato produza ruptura no solo semelhante ao mecanismo de uma força distribuída sobre uma fundação direta circular (CARLETTO, 2009, p. 28).

⁶ MODONI, G.; CROCE, P.; MONGIOVÌ, L. Theoretical modeling of jet grouting. **Géotechnique**, London, v. 56, n. 5, p. 335-47, 2006.

5.3 AÇÃO DO JATO DE NATA DE CIMENTO

Carletto (2009, p. 28) apresenta um modelo de Mondoni que propõe relação entre a ação erosiva de um jato numa pressão de impacto equivalente. Essa pressão é proporcional à força (oriunda da mudança da quantidade de movimento do jato quando atinge a massa sólida) de um jato de um fluido incompressível numa placa ortogonal plana. A relação é dada por:

$$\Psi = \Omega_1 \times \frac{\gamma_f}{g} \times v_f^2 \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

Ψ = Pressão de impacto equivalente;

Ω_1 = Parâmetro adimensional que leva em conta a dissipação de energia;

γ_f = Peso específico da nata de cimento (N/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

v_f = Velocidade de saída do jato nos pontos de contato com o terreno (m/s).

O fator de dissipação de energia leva em conta a perda de uma parcela da energia que o jato sofre ao entrar em contato com a calda já injetada antes de colidir com o solo.

5.4 RESISTÊNCIA DO SOLO ARGILOSO AO JATO DE NATA DE CIMENTO

A resistência de um solo argiloso à ação erosiva do jato é diretamente proporcional à sua resistência ao cisalhamento não drenada, quanto maior a resistência ao cisalhamento não drenada, maior é a resistência do solo à erosão. Carletto (2009) apresenta a seguinte equação para a resistência do solo argiloso a propagação do jato:

$$\Psi_c = \Omega_3 \times S_u \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

Ψ_c = Resistência à erosão;

Ω_3 = Parâmetro adimensional de calibração;

S_u = Resistência ao cisalhamento não drenada.

6 METODOLOGIA DE ENSAIO

Devido à inexistência de uma metodologia de ensaios consolidada para este experimento, foi necessário o desenvolvimento da mesma para a execução do trabalho. Primeiramente foi desenvolvida pelos professores do laboratório de geotecnia da UFRGS uma concepção básica de como poderiam ser feitos os ensaios. Assim, se chegou ao conceito básico de injetar, horizontalmente, nata de cimento em solo argiloso através de uma haste (simulando a estaca torpedo) com o auxílio de uma bomba hidráulica.

A partir do conceito inicial da metodologia de ensaio, foram levantados os equipamentos e materiais necessários para a sua execução e, posteriormente, foram feitos os primeiros ensaios teste. Num segundo momento, a metodologia foi analisada para então ser aprimorada nos pontos necessários, resultando na metodologia de ensaio definitiva.

Este capítulo descreve, portanto, todas as etapas e recursos utilizados no desenvolvimento da metodologia de ensaios (ensaios preliminares). Por fim, são apresentados todos os recursos necessários para a execução dos ensaios definitivos (materiais e equipamentos), sua metodologia e o programa experimental da pesquisa.

6.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Após a concepção inicial dos ensaios como descrito na introdução deste capítulo, foram levantados os materiais e equipamentos necessários para a execução dos ensaios preliminares. Com os recursos necessários para sua execução, conforme a concepção inicial elaborada, os ensaios foram executados para a análise do seu grau de satisfação. Concluindo, foram analisados os resultados dos ensaios preliminares para o aperfeiçoamento da metodologia.

6.1.1 Materiais

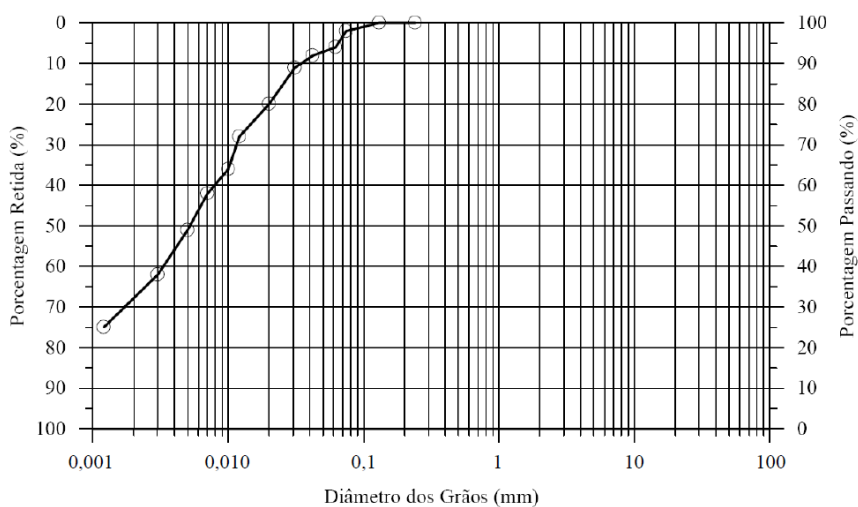
Esta seção descreve todos os materiais utilizados nos ensaios preliminares. Cabe ressaltar que não houve mudança nos materiais utilizados na metodologia dos ensaios definitivos, como é explicado na seção pertinente a mesma.

6.1.1.1 Caulim

Segundo a NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), o caulim é um mineral argiloso constituído por grande quantidade de caulinita, um silicato de alumínio hidratado. Contém ainda outro silicato de alumínio hidratado, a haloisita. Estes dois compostos estão no grupo de nome homônimo (grupo caulinita), que engloba também os argilominerais diquita e nacrita. Segundo a mesma norma, o caulim também apresenta 40 a 50% do volume de impurezas como areia, quartzo, feldspato, etc. Apresenta geralmente cor clara devido à ausência de óxido de ferro.

Abaixo são mostradas a curva granulométrica (figura 12) e as propriedades físicas (tabela 3) apresentadas por Feuerharmel (2000) para este material. Para os ensaios deste trabalho, foi utilizado caulim comercial da fábrica Inducal - Indústria de calcários Ltda., que é vendido ensacado conforme mostra a figura 13.

Figura 12 – Curva granulométrica do caulim



(fonte: adaptado de FEUERHARMEL, 2000)

Tabela 3 – Propriedades físicas do caulim

Propriedade física	Valor médio
Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	26,40
Diâmetro médio das partículas, D_{50} (mm)	0,005
% de areia fina	6,00
% de silte	61,00
% de argila	33,00
Limite de liquidez (%)	39,00
Limite de plasticidade (%)	34,00
Índice de plasticidade (%)	5,00

(fonte: adaptado de FEUERHARMEL, 2000)

Figura 13 – Caulim comercial utilizado nos ensaios

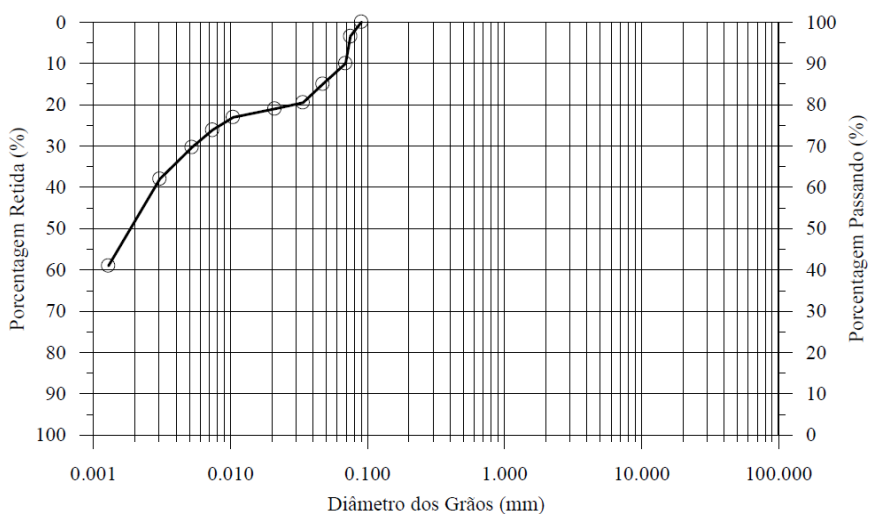


(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.1.2 Bentonita

A bentonita é uma argila de alta expansibilidade devido à massiva presença do argilomineral montmorilonita (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). A bentonita utilizada foi a mesma caracterizada por Heineck (2002), que apresentou sua curva granulométrica (figura 14) e suas propriedades físicas (tabela 4). A mesma autora também classificou a bentonita como uma argila de alta plasticidade, de acordo com a NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). Para os ensaios foram utilizados sacos de bentonita comercial da marca Bentonisa - Bentonita do nordeste S.A., em detalhe na figura 15.

Figura 14 – Curva granulométrica da bentonita



(fonte: HEINECK, 2002)

Tabela 4 – Propriedades físicas da bentonita

Propriedade física	Valor médio
Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	30,90
Diâmetro médio das partículas, D_{50} (mm)	0,0021
% de areia fina	3,41
% de silte	46,17
% de argila	50,42
Limite de liquidez (%)	600,00
Limite de plasticidade (%)	45,00
Índice de plasticidade (%)	555,00

(fonte: adaptado de HEINECK, 2002)

Figura 15 – Bentonita comercial utilizada nos ensaios



(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.1.3 Água

Nos ensaios executados no trabalho, foi usada água fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), órgão responsável pela captação, tratamento e distribuição de água no município e Porto Alegre. Os parâmetros de qualidade da água distribuída são regidos pela Portaria 2914/11 do DMAE, que está disponível em seu site.

6.1.1.4 Mistura caulim e bentonita (argila)

O solo utilizado nos ensaios foi uma mistura do caulim e da bentonita descritos nos itens anteriores. Essa mistura é referida no trabalho apenas como "argila". A proporção da mistura é de 80% de caulim e 20% de bentonita em peso, com umidade de 120%, equivalente à umidade dos solos dos leitos oceânicos.

Conforme o apresentado no item 4.3 deste trabalho, por questões de efeito de escala, essa mistura é considerada como representativa do solo do leito marítimo da Bacia de Campos (apresenta a mesma coesão), local onde estão localizados campos de petróleo da Petrobras.

Jung (2012) realizou experimentos de fluidização da mesma argila. Em seu trabalho o autor submeteu o material a ensaios de caracterização dos limites de Atterberg, do peso específico dos grãos e de granulometria a laser. Segundo o autor, os ensaios foram realizados no laboratório de materiais cerâmicos da UFRGS conforme as normas NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984a) e NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984b). A tabela 5 apresenta as propriedades físicas da argila.

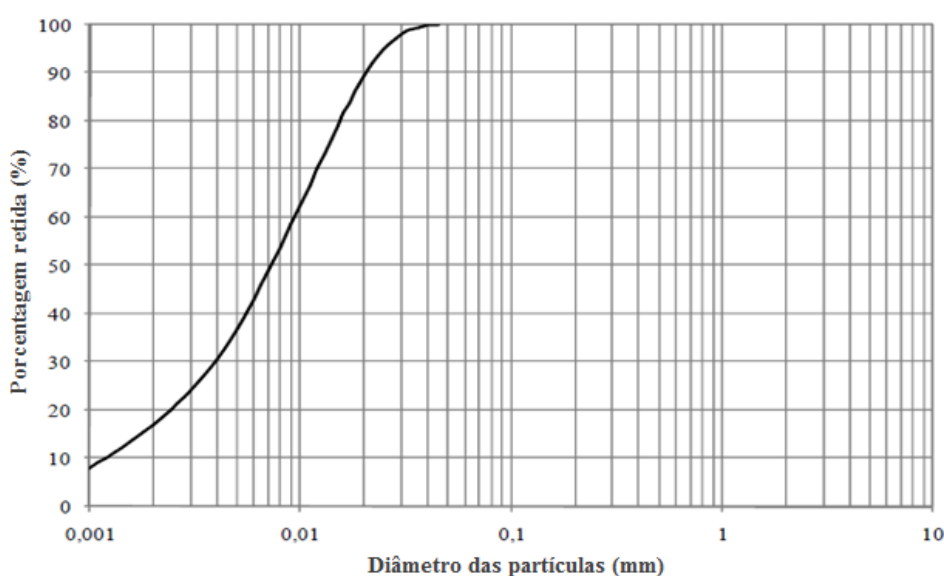
Tabela 5 – Propriedades da argila

Propriedade	Valor
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	25,69 kN/m ³
% silte	17,21
% argila	82,79
Limite de liquidez (%)	102,10
Limite de plasticidade (%)	32,20
Índice de plasticidade (%)	69,90
Índice de vazios	3,22
Peso específico aparente úmido (kN/m ³)	13,71 kN/m ³

(fonte: adaptado de JUNG, 2012)

Para a determinação das porcentagens de silte e argila, Jung (2012) utilizou o método de classificação da NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), no qual considera argila qualquer partícula com dimensões menores que 0,002 mm, silte como as partículas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 0,002 mm e areia fina as partículas com diâmetros compreendidos entre 0,2 mm e 0,06 mm. No mesmo trabalho, Jung (2012) classificou esta mistura como uma argila de alta plasticidade. A figura 16 apresenta a curva granulométrica do material.

Figura 16 – Curva granulométrica da argila



(fonte: adaptado de JUNG, 2012)

Por fim, Jung (2012) caracterizou a argila de seus ensaios (a mesma mistura do presente trabalho) em relação à resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) e à razão entre a resistência ao cisalhamento não-drenada e a tensão vertical efetiva (S_u/σ'_{v0}). Para a determinação da resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) foram realizados ensaios de mini-palhetas (*mini vane test*). A tabela 6 apresenta os resultados obtidos pelo autor.

Tabela 6 – Propriedades de resistência da argila

Propriedade	Valor
Resistência ao cisalhamento não drenada (kPa)	0,10
S_u/σ'_{v0}	0,34

(fonte: adaptado de JUNG, 2012)

6.1.1.5 Nata de cimento

A nata de cimento utilizada foi uma mistura de água, cimento e aditivo retardador de pega, sem a presença de agregados. Os materiais utilizados na mistura foram:

- a) cimento CP V-ARI, cimento Portland de alta resistência inicial da marca Resdil, normatizado pela NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 1991);
- b) água, a mesma água descrita no item 6.1.1.3;
- c) aditivo retardador de pega do tipo Muraplast FK 99 - Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega, da empresa Mc-Bauchemie.

O aditivo se justifica para retardar a pega do cimento a fim de ser feita a limpeza dos equipamentos sem a cimentação da mistura.

Stracke (2012), em seu trabalho da mesma linha de pesquisa deste, analisou diversas misturas de água, cimento e bentonita, para verificar qual seria a maior relação a/c que não segregasse a mistura. A autora então concluiu que o fator de a/c de 0,75, 5% de bentonita e 0,25% de aditivo retardador de pega (em relação ao peso seco de cimento) seria a mais satisfatória, pois teria fluidez e um alto fator de água/cimento. A mistura do presente trabalho não inclui 5% de bentonita, pois a mistura ficava pouco tempo em repouso, o que não justificava a adição de bentonita, que mantém as partículas de cimento em suspensão.

Sendo assim, a nata de cimento do trabalho tem as seguintes características:

- a) fator água/ cimento de 0,75;
- b) 0,25% de aditivo retardador de pega.

6.1.2 Equipamentos

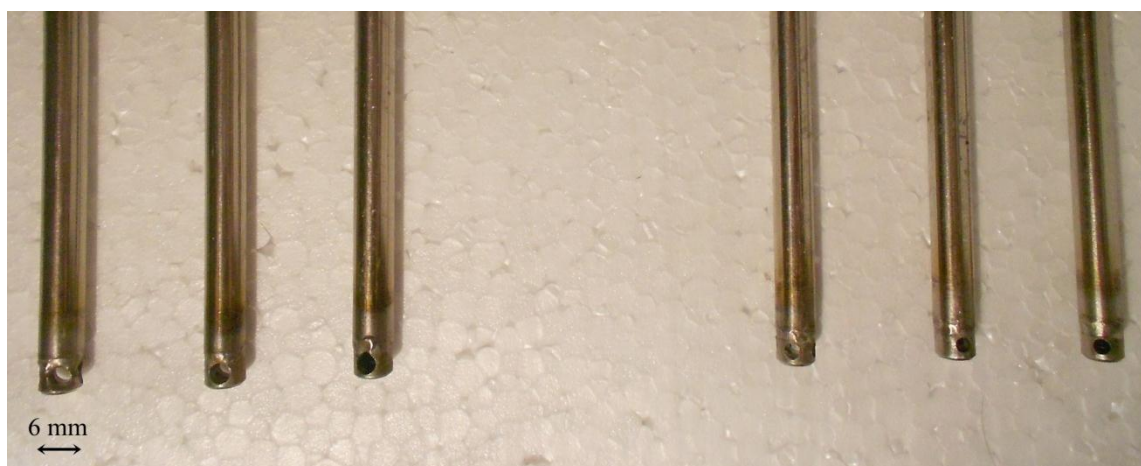
Esta seção descreve todos os equipamentos utilizados nos ensaios preliminares. Cabe ressaltar que na metodologia definitiva não houve mudança dos equipamentos utilizados, como é explicado na seção da mesma.

6.1.2.1 Hastes de injeção

Eram hastes tubulares de aço inox de 40,7 cm de comprimento e 6 mm de diâmetro interno. Tinham sua extremidade superior aberta para a conexão na mangueira de recalque da bomba.

A sua extremidade inferior era fechada, porém continha os furos, os quais tinham seus eixos perpendiculares ao eixo da haste (figura 17). As hastes de 2 e 4 furos tinham os eixos de seus furos formando ângulos de 180 e 90 graus, respectivamente. Para os ensaios preliminares foi utilizada somente a haste com um furo de injeção com diâmetro de 4 mm, conforme mostra a tabela 7.

Figura 17 – Detalhe dos furos das hastes de injeção



(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.2.2 Bomba hidráulica

A bomba utilizada para injeção nos ensaios preliminares foi uma bomba helicoidal modelo VGF (figura 18), da marca Valge, com potência de 0,5 kW. Trata-se de uma bomba helicoidal indicada para bombear líquidos com alto teor de sólidos, alta viscosidade, alta abrasividade e meios quimicamente agressivos. Logo se enquadra como ideal para a injeção de nata de cimento. Este modelo pode bombear de 0,65 até 120 m³/h, dependendo da viscosidade do líquido bombeado. A pressão máxima de recalque é de 120 m.c.a.

Figura 18 – Bomba hidráulica helicoidal utilizada nos ensaios



(fonte: VALDIR GEREMIA IND. E COM. LTDA., 2014)

6.1.2.3 Inversor de frequência

O inversor de frequência da bomba é da marca DANFOSS, modelo FC051-PK75S2, apresentado na figura 19. Possui entrada de tensão monofásica (220 V) e saída para o motor trifásica (220/380 V). Possui corrente nominal de 6,8 A. Era instalado entre a fonte de energia elétrica e a bomba helicoidal, com a finalidade de controlar a vazão da bomba nos ensaios. Antes da execução dos ensaios era necessário fazer uma calibração de cada haste de injeção para estipular qual era a vazão de nata associada a cada frequência estipulada no inversor de frequência.

Figura 19 – Inversor de frequência utilizado nos ensaios



(fonte: STRACKE, 2012)

6.1.2.4 Tanque de armazenamento do solo

Era um tanque de fibra de vidro com capacidade de 130 litros, utilizado para armazenamento de água e outros líquidos. O tanque tinha seção transversal retangular e era no formato de um paralelepípedo (figura 20). As dimensões do tanque eram de aproximadamente: 65 cm de comprimento, 40 cm de largura e 50 cm de altura. O solo era armazenado no tanque, onde também eram executados os ensaios.

Figura 20 – Tanque utilizado para os ensaios



(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.2.5 Betoneira

A betoneira utilizada nos ensaios foi da marca Betomaq, modelo Misturador Vertical V100, conforme figura 21. Segundo o fabricante, é indicada para misturas homogêneas de argamassas e solo-cimento fluídos para injeção. Possui capacidade para misturar em torno de 100 litros através de turbo hélice misturadora em eixo vertical, acionada por motor elétrico.

Figura 21 – Betoneira utilizada nos ensaios



(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.3 Pré-definições para os ensaios preliminares

Foi realizada primeiramente a calibração da bomba helicoidal com o inversor de frequência. Para isto foi usada a mesma mistura de nata de cimento que seria injetada. Esta calibração servia para estimar quais eram a vazão e velocidade de saída do jato para cada frequência estipulada no inversor de frequência. Nesta etapa foi executada a calibração para a haste de injeção (tabela 7) pré-estabelecida como a que seria utilizada nos ensaios preliminares.

Tabela 7 – Pré-definições para os ensaios preliminares

Diâmetro do furo	Nº de furos	Área de saída do furo (mm ²)	Área total de saída do jato (mm ²)
4 mm	1	12,57	12,57

(fonte: elaborada pelo autor)

Foram também estabelecidos quais e quantos ensaios seriam executados e, conseqüentemente, seus parâmetros. Estes valores preliminares foram baseados nos trabalhos de Stracke (2012) e Jung (2012). A tabela 8 mostra estes parâmetros para os ensaios preliminares.

Tabela 8 – Parâmetros dos ensaios preliminares

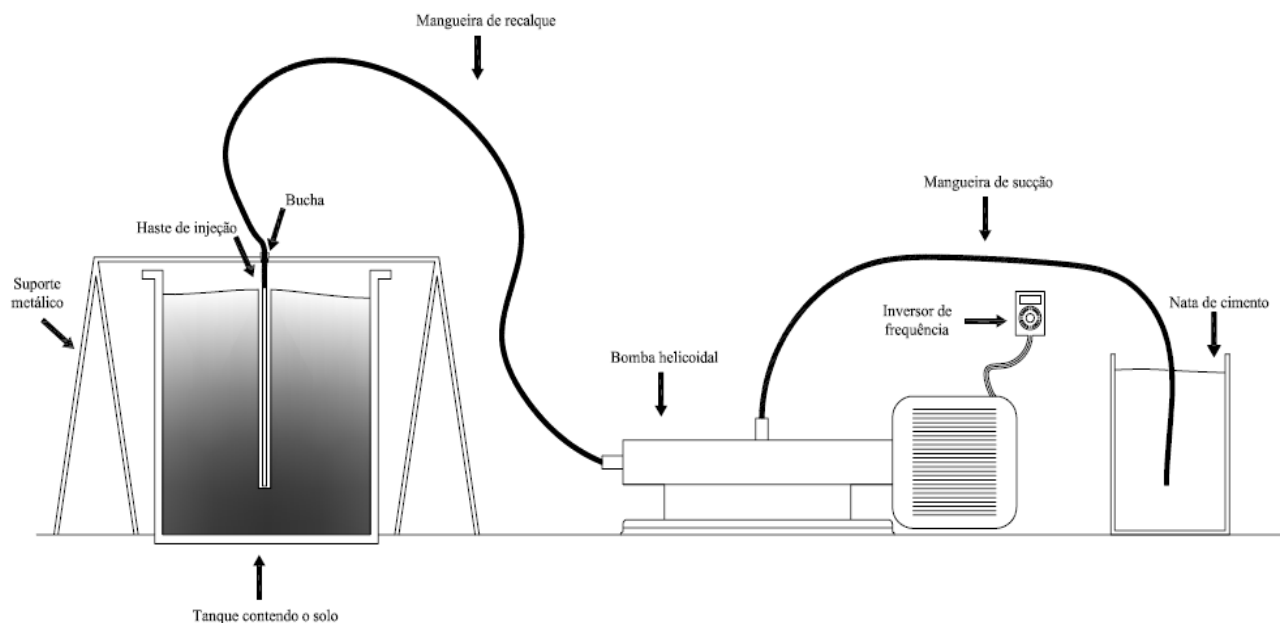
	Diâmetro do furo	Nº de furos	Área de saída do furo (mm ²)	Área total de saída do jato (mm ²)	Volume injetado por furo (ml)	Volume injetado total (ml)	Tempo de injeção (s)	Velocidade de saída do jato (m/s)
Injeção 1	4 mm	1	12,57	12,57	100,00	100,00	4,00	1,99
Injeção 2			12,57	12,57			9,00	0,88
Injeção 3			12,57	12,57	250,00	250,00	4,00	4,97
Injeção 4			12,57	12,57			9,00	2,21
Injeção 5			12,57	12,57	500,00	500,00	4,00	9,95
Injeção 6			12,57	12,57			9,00	4,42

(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.4 Metodologia dos ensaios preliminares

Esta seção descreve a metodologia preliminar desenvolvida para os ensaios, e todos os passos para a execução do ensaio de injeção. A figura 22 mostra um esquema geral da disposição de cada equipamento para a execução propriamente dita da injeção de nata de cimento.

Figura 22 – Esquema da distribuição dos equipamentos usados nos ensaios



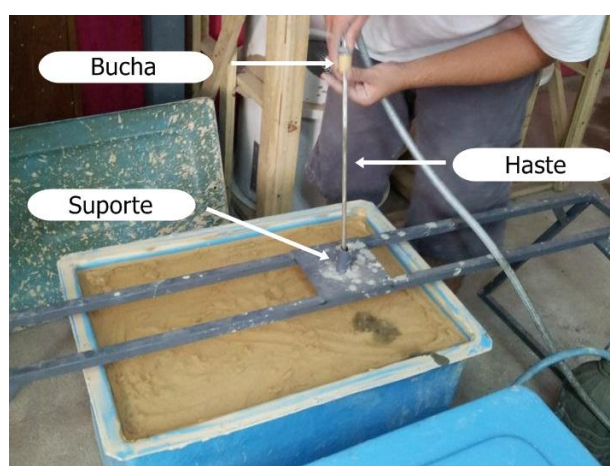
(fonte: elaborada pelo autor)

Primeiramente era feita a mistura da argila através da betoneira. O solo então era mantido no tanque de 130 litros. Era esperado no mínimo um dia para o ensaio de injeção.

A seguir era feita a mistura que formava a nata a ser injetada com o traço apresentado anteriormente. A mistura era feita e mantida, até sua injeção, em um recipiente plástico. Era necessário tomar cuidado para que o ensaio fosse executado antes da mistura entrar em pega. Isso poderia prejudicar o ensaio, além de danificar a bomba hidráulica. Para este controle, antes de iniciar o bombeamento, a nata era examinada visualmente para verificação de sua consistência.

Começava então o ensaio propriamente dito de injeção da nata no tanque contendo o solo. A haste era penetrada no solo manualmente. Para garantir a verticalidade e fixação da haste, era utilizado um cavalete metálico e uma bucha, conforme a figura 23. A haste era então posicionada, e a mangueira de sucção da bomba era colocada no recipiente contendo a nata. A ligação entre a mangueira e a haste era feita por braçadeiras. O inversor de frequência era ajustado para que a velocidade fosse a desejada e a bomba era ligada. Com um cronômetro era controlado o tempo de injeção para que o volume injetado fosse o pré-estabelecido. Após o tempo de injeção transcorrido a bomba era desligada e a haste era removida manualmente. Foram estipuladas duas injeções por tanque a fim de evitar a sobreposição e influência entre as mesmas.

Figura 23 – Cravação da haste para a injeção



(fonte: elaborada pelo autor)

A nata de cimento era então deixada em processo de cura por, no mínimo, 72 horas.

Para a análise do resultado da injeção o solo era removido cuidadosamente e inspecionado tátil e visualmente para a verificação da forma geométrica de nata ligada à haste de injeção (figura 24). Era possível encontrar a forma geométrica solidária à haste, pois, após a retirada da mesma no fim do ensaio, uma certa quantidade da nata que preenchia a haste de injeção migrava para o orifício deixado pela mesma.

A etapa de procura da forma era de extrema importância, pois era necessário cuidado para que fosse encontrada exatamente a forma geométrica adquirida pela nata na ponta de haste de injeção. Qualquer movimento brusco poderia quebrar a forma e o ensaio seria perdido.

Figura 24 – Processo de procura da forma geométrica

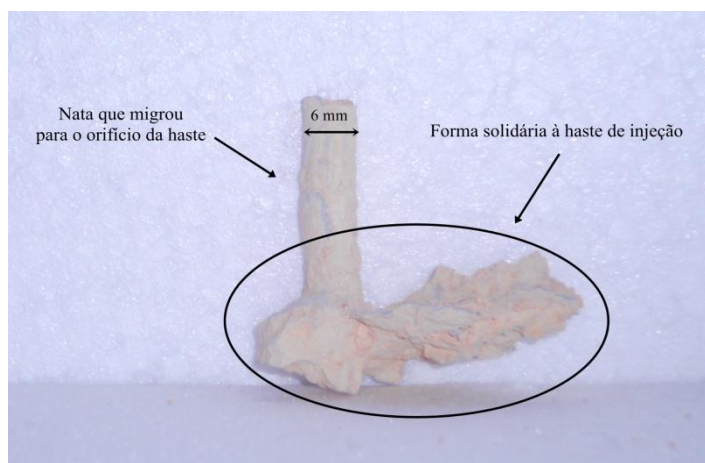


(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.5 Resultados e análises dos ensaios preliminares

Dos resultados dos ensaios preliminares, foram encontradas apenas algumas formas geométricas solidárias à haste de injeção. Conforme explicado na seção anterior, era notável a forma geométrica solidária à haste devido à migração da nata. A figura 25 exemplifica isto.

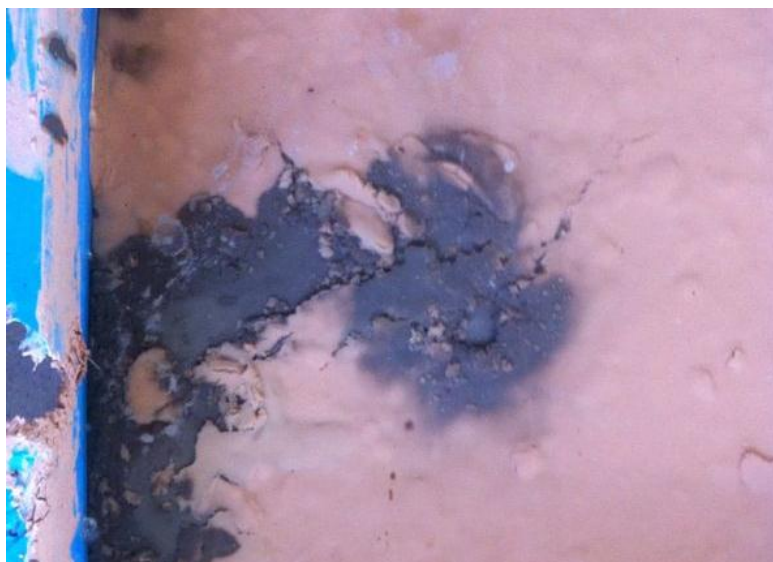
Figura 25 – Exemplo da forma geométrica solidária à haste de injeção



(fonte: elaborada pelo autor)

Em algumas injeções não foi possível encontrar nenhuma forma geométrica na base da haste de injeção. Nessas injeções foi observado que, durante o ensaio, a nata de cimento extravasava pela superfície do solo argiloso (figura 26) através de fissuras formadas no solo e intensificadas pelo fluxo da nata. Entende-se este fenômeno como ruptura hidráulica, que, de acordo com as observações, está associada às altas velocidades de saída do jato.

Figura 26 – Exemplo de extravasamento da nata de cimento



(fonte: elaborada pelo autor)

Assim sendo, foi feita a análise das injeções em que foram encontradas formas ligadas à haste e as injeções nas quais nenhuma forma foi encontrada. A tabela 9 resume os resultados de tal forma que a injeção classificada de grau III é considerada uma injeção bem satisfatória (com

forma geométrica bem definida solidária à haste), a grau II uma injeção satisfatória (com forma geométrica não muito bem definida, porém solidária à haste) e a grau I (sem nenhuma forma geométrica solidária à haste). As injeções grau I foram consideradas aquelas em que a nata de cimento se espalhava de forma aleatória e formava grumos indefinidos em diversos pontos do container de solo, porém nunca resultando em formas como a apresentada na figura 25.

Tabela 9 – Resultado dos ensaios preliminares

	Diâmetro do furo	Nº de furos	Área de saída do furo (mm ²)	Volume injetado por furo (ml)	Tempo de injeção (s)	Velocidade de saída do jato (m/s)	Resultados
Injeção 1	4 mm	1	12,57	100,00	4,00	1,99	Grau II
Injeção 2			12,57		9,00	0,88	Grau III
Injeção 3			12,57	250,00	4,00	4,97	Grau I
Injeção 4			12,57		9,00	2,21	Grau III
Injeção 5			12,57	500,00	4,00	9,95	Grau I
Injeção 6			12,57		9,00	4,42	Grau I

(fonte: elaborada pelo autor)

Após as análises dos ensaios preliminares, pode ser observado que:

- a) as fissuras presentes antes de injeção facilitavam a saída da nata de cimento até a superfície do solo. Essas fissuras eram devido à retração do solo relacionada à perda de umidade durante a cura do mesmo;
- b) quanto maior a velocidade de saída do jato, maior é a tendência de extravasamento e distribuição aleatória da nata de cimento do solo.

6.2 ENSAIOS DEFINITIVOS

Esta seção trata de todos os aspectos dos ensaios definitivos: metodologia, materiais e equipamentos. Também apresenta o programa dos ensaios realizados.

6.2.1 Metodologia dos ensaios definitivos

Com base na análise dos resultados dos ensaios preliminares, a metodologia utilizada nos mesmos foi revista. De acordo com o item a) das alíneas do item 6.1.5, foi adotada apenas uma modificação para a metodologia de ensaio definitiva.

Após a colocação da argila no tanque para a execução do ensaio, era adicionada uma lâmina de água (aproximadamente 2 cm) na superfície para que, após a colocação do solo, o mesmo não apresentasse as fissuras observadas nos ensaios preliminares. Estas fissuras deveriam ser evitadas, pois facilitavam a saída da nata para a superfície e, conseqüentemente, a maior tendência da nata não formar uma geometria adjacente à haste de injeção.

Ademais, a **metodologia para os ensaios definitivos foi a mesma utilizada nos ensaios preliminares, incluindo os materiais e equipamentos.**

6.2.2 Programa experimental

O programa experimental foi elaborado a partir da análise dos ensaios preliminares. Como analisado na alínea b) do item 6.1.5, as menores velocidades de saída do jato tendem a resultar em formas geométricas mais bem definidas.

Assim sendo, foi estabelecido que seriam executados ensaios com a velocidade de saída do jato de 1,99 e 0,88 m/s (injeções 1 e 2), e da velocidade intermediária de 1,44 m/s. Todas as injeções foram de 100 ml por furo da haste.

A tabela 10 apresenta o programa experimental com todos os parâmetros de cada ensaio e o seu respectivo número de identificação.

Tabela 10 – Programa experimental

Número de indentificação	Diâmetro do furo	Nº de furos	Área de saída do jato (mm ²)	Área total de saída do jato (mm ²)	Volume injetado por furo (ml)	Volume injetado total (ml)	Tempo de injeção (s)	Velocidade de saída do jato (m/s)
Injeção 7	4 mm	1	12,57	12,57	100,00	100,00	4,00	1,99
Injeção 8			12,57	12,57			5,53	1,44
Injeção 9			12,57	12,57			9,00	0,88
Injeção 10		2	100,00	200,00	4,00	1,99		
Injeção 11					5,53	1,44		
Injeção 12					9,00	0,88		
Injeção 13		4	100,00	400,00	4,00	1,99		
Injeção 14					5,53	1,44		
Injeção 15					9,00	0,88		
Injeção 16	3 mm	1	7,07	7,07	100,00	100,00	7,11	1,99
Injeção 17			7,07	7,07			9,82	1,44
Injeção 18			7,07	7,07			16,08	0,88
Injeção 19		2	100,00	200,00	7,11	1,99		
Injeção 20					9,82	1,44		
Injeção 21					16,08	0,88		
Injeção 22		4	100,00	400,00	7,11	1,99		
Injeção 23					9,82	1,44		
Injeção 24					16,08	0,88		

(fonte: elaborada pelo autor)

7 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS

Após a execução dos ensaios, foram levantados todos os resultados para serem apresentados em forma de gráficos e imagens. A influência da injeção de nata de cimento no desempenho das estacas (hastes) não foi avaliada.

A análise dos resultados foi feita através de gráficos do volume e da área da base das formas solidárias à haste de injeção versus a variável em questão (velocidade de saída do jato, número e diâmetro dos furos de injeção). Este capítulo traz algumas considerações de como foram feitas as medidas das formas para o estabelecimento de seu volume e da área de sua base.

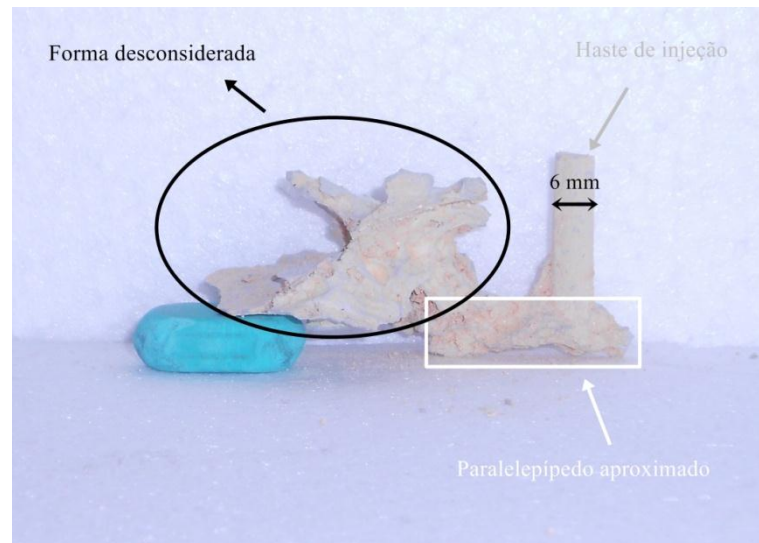
Por fim, o capítulo mostra a análise da influência das variáveis abordadas neste trabalho: velocidade de saída do jato de nata, número e diâmetro dos furos de saída da nata. Todas as imagens das formas geométricas estão no apêndice do trabalho, seguindo a numeração conforme o programa experimental.

7.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME E DA ÁREA DA BASE DAS FORMAS GEOMÉTRICAS SOLIDÁRIAS À HASTE DE INJEÇÃO

Para a determinação do volume e da área da base das formas geométricas solidárias à haste de injeção foram feitas três medidas (comprimento, profundidade e altura) aproximando a forma a um paralelepípedo na base da haste.

O volume foi considerado como a multiplicação das três dimensões, e a área da base foi considerada a multiplicação do comprimento pela profundidade. Porém algumas formas continham finas lâminas e partes pontiagudas solidárias à haste de injeção, ficando fora do paralelepípedo formado. Assim sendo, essa fina lâmina e partes pontiagudas não foram consideradas nas medidas. A figura 27 mostra um exemplo das partes consideradas e desconsideradas nas medidas. Tal procedimento foi adotado, pois se supôs que as lâminas delgadas contribuem minimamente para a melhoria do desempenho das estacas.

Figura 27 – Partes consideradas e desconsideradas das formas geométricas



(fonte: elaborada pelo autor)

No apêndice encontram-se três fotos (vista frontal, lateral e inferior) de cada forma geométrica e suas respectivas medidas consideradas.

Também cabe ressaltar que nas injeções nas quais não foi encontrada nenhuma forma geométrica solidária à haste de injeção foi considerado o valor zero para as três medidas. Logo seu volume e área da base são também zero.

7.2 DIMENSÕES, VOLUME E ÁREA DA BASE DAS FORMAS GEOMÉTRICAS SOLIDÁRIAS À HASTE DE INJEÇÃO

Abaixo é apresentada a tabela com as dimensões, o volume e a área da base (calculados conforme explicado no item anterior) de cada ensaio.

Tabela 11 – Dimensões, volume e área da base das formas geométricas

Número de identificação	Diâmetro do furo	Nº de furos	Velocidade de saída do jato (m/s)	Comprimento (cm)	Profundidade (cm)	Altura (cm)	Volume da forma (cm ³)	Área da base da forma (cm ²)
Injeção 7	4 mm	1	1,99	2,09	1,45	0,85	2,58	3,03
Injeção 8			1,44	3,31	1,35	1,10	4,92	4,47
Injeção 9			0,88	2,35	1,39	1,61	5,26	3,27
Injeção 10		2	1,99	3,61	1,29	1,19	5,54	4,66
Injeção 11			1,44	3,50	1,00	0,55	1,93	3,50
Injeção 12			0,88	2,45	1,44	1,61	5,68	3,53
Injeção 13		4	1,99	4,49	1,49	1,35	9,03	6,69
Injeção 14			1,44	3,49	2,63	1,11	10,19	9,18
Injeção 15			0,88	3,58	1,10	0,49	1,93	3,94
Injeção 16	3 mm	1	1,99	1,95	1,12	2,13	4,65	2,18
Injeção 17			1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Injeção 18			0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Injeção 19		2	1,99	1,95	1,41	1,30	3,57	2,75
Injeção 20			1,44	2,34	1,69	2,55	10,08	3,95
Injeção 21			0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Injeção 22		4	1,99	3,10	2,12	1,10	7,23	6,57
Injeção 23			1,44	3,95	1,91	1,33	10,03	7,54
Injeção 24			0,88	2,62	1,54	1,41	5,69	4,03

(fonte: elaborada pelo autor)

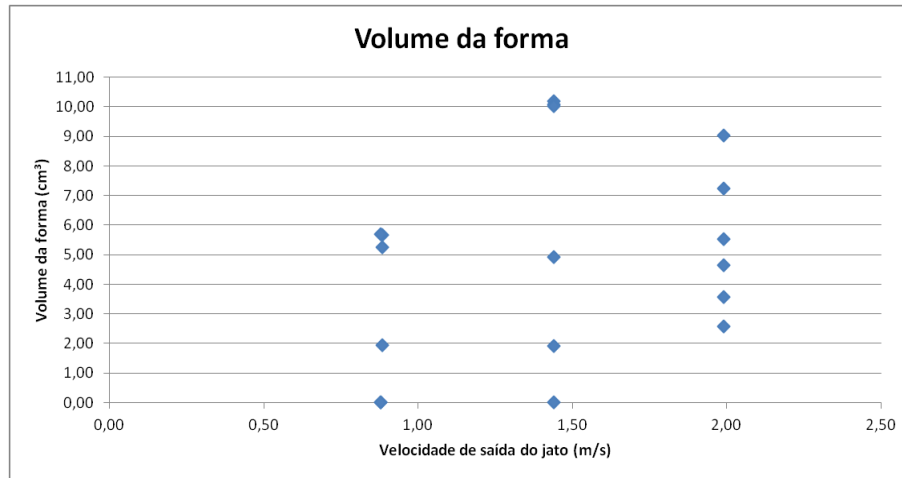
Pode-se notar do quadro a pouca variação das medidas de altura e profundidade. A altura da forma geométrica varia pouco porque depende do diâmetro do jato. Como a variação do diâmetro dos jatos na pesquisa foi pequena (1 mm) se comparada as dimensões das formas, não houve considerável variação nas alturas das formas geométricas.

Já quanto à profundidade, seria esperado que as hastes de 4 furos apresentassem uma forma mais aproximada a um cubo do que a um paralelepípedo. Isto não foi observado, sendo os valores das profundidades predominantemente entre 1,5 e 2 cm.

7.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO JATO DE NATA

O gráfico da figura 28 mostra a velocidade de saída do jato (eixo das abscissas) versus o volume da forma geométrica adquirida pela nata (eixo das ordenadas).

Figura 28 – Influência da velocidade de saída do jato no volume da forma geométrica

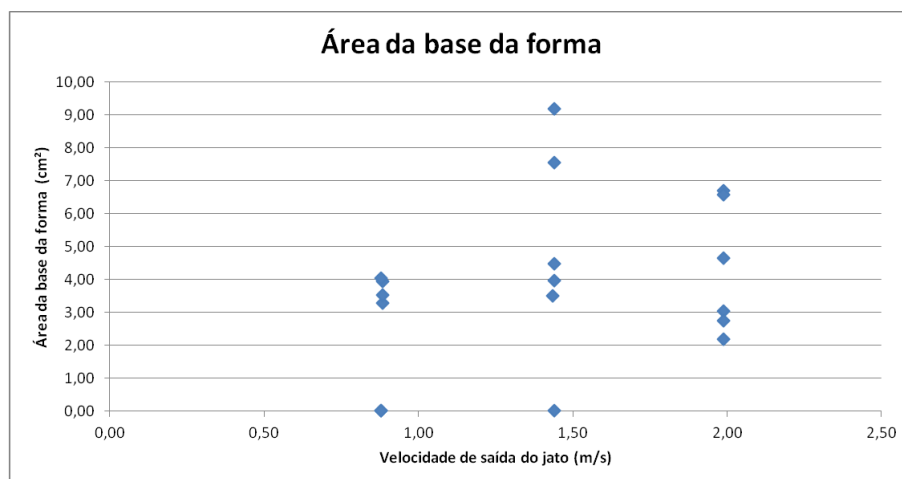


(fonte: elaborado pelo autor)

Tirando-se a média aritmética dos volumes das formas para cada velocidade, observa-se para a velocidade de saída do jato de 0,88 m/s um valor de aproximadamente 3 cm³, para a velocidade de 1,44 m/s aproximadamente de 6,2 cm³ e para 1,99 m/s aproximadamente 5,4 cm³. Porém a análise básica da média aritmética é fortemente influenciada pelos valores extremos, sendo notável que, apesar da velocidade de 1,44 m/s ter a maior média, a mesma tem também a maior dispersão.

O gráfico da figura 29 mostra também a velocidade de saída do jato (eixo das abscissas), porém o eixo das ordenadas mostra a área da base da forma geométrica adquirida pela nata.

Figura 29 – Influência da velocidade de saída do jato na área da base da forma geométrica



(fonte: elaborado pelo autor)

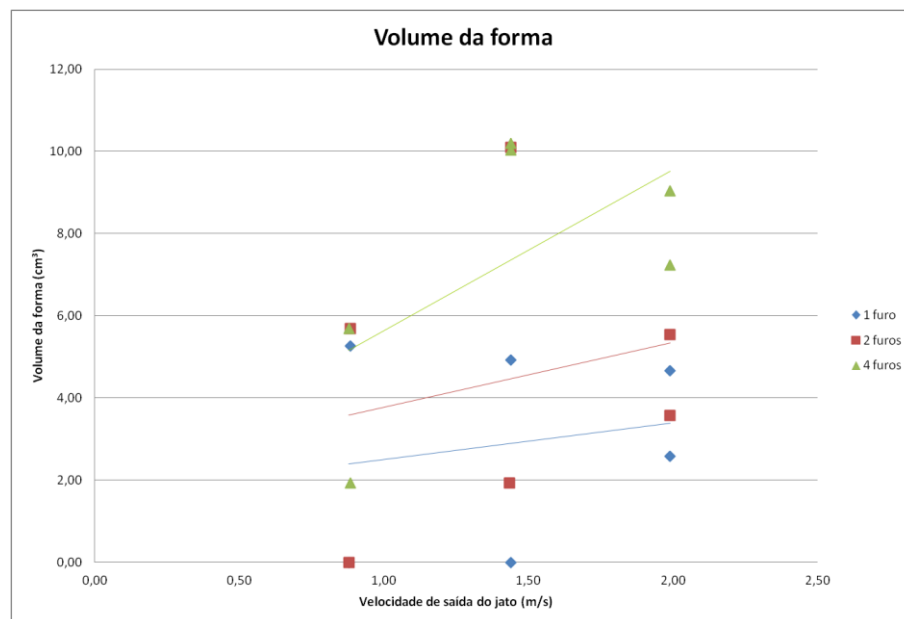
Nota-se que, para a área da base da forma, acontece o mesmo comportamento. A velocidade de 1,44 m/s tem uma média de valores maior (aproximadamente 4,8 cm²), porém apresenta também maior dispersão.

É importante ressaltar a influência dos valores extremos nos resultados. Tanto os valores iguais a zero dos ensaios em que não foi encontrada nenhuma forma geométrica solidária à haste, quanto dos ensaios em que os pontos no gráfico encontram-se muito acima dos demais.

7.4 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FUROS DE SAÍDA DO JATO DE NATA

O gráfico da figura 30 mostra a velocidade de saída do jato para cada haste com diferentes números de furo de injeção (eixo das abscissas) versus o volume da forma geométrica adquirida pela nata (eixo das ordenadas).

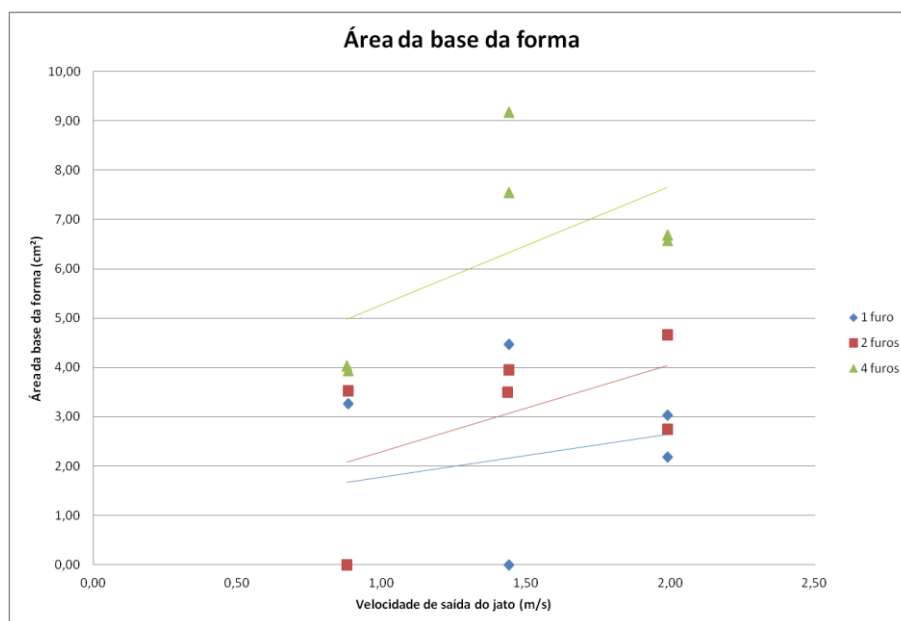
Figura 30 – Influência do número de furos de saída do jato no volume da forma geométrica



(fonte: elaborado pelo autor)

Já o gráfico da figura 31 mostra a velocidade de saída do jato para cada haste com diferentes números de furos de injeção (eixo das abscissas) versus a área da forma geométrica adquirida pela nata (eixo das ordenadas).

Figura 31 – Influência do número de furos de saída do jato na área da base da forma geométrica



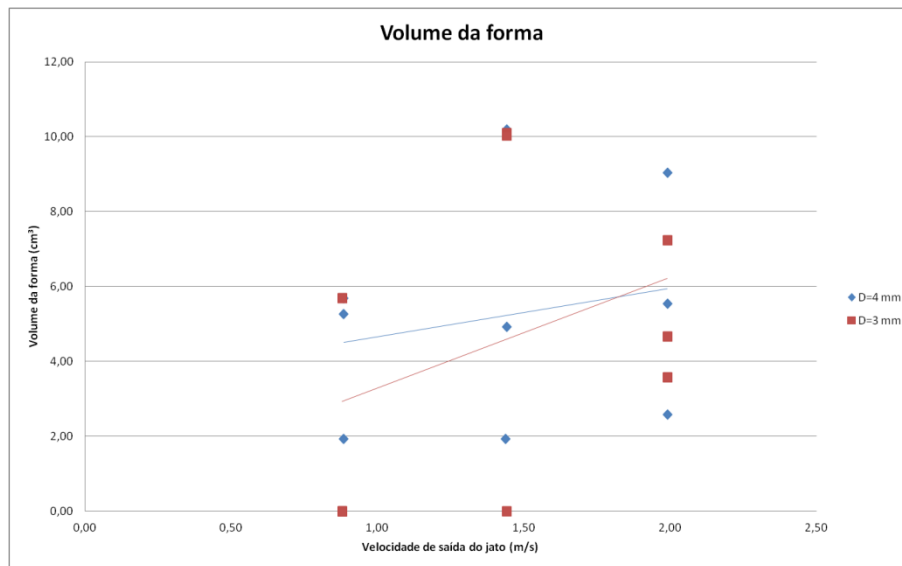
(fonte: elaborado pelo autor)

Como esperado, da figura 30 e da figura 31 pode-se observar que, quanto maior o número de furos de injeção, maior será o volume e a área da base da forma geométrica solidária à haste de injeção. Isto está relacionado ao fato de que quanto mais furos de injeção, maior foi o volume total de nata injetado, já que todos os ensaios foram feitos com 100 ml por furo. Esse fato está de acordo também com uma análise preliminar de que, quanto maior o volume injetado, maior é a forma geométrica solidária à haste.

7.5 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DOS FUROS DE SAÍDA DO JATO DE NATA

O gráfico da figura 32 mostra a velocidade de saída do jato para cada diâmetro do furo de injeção (eixo das abscissas) versus o volume da forma geométrica adquirida pela nata (eixo das ordenadas).

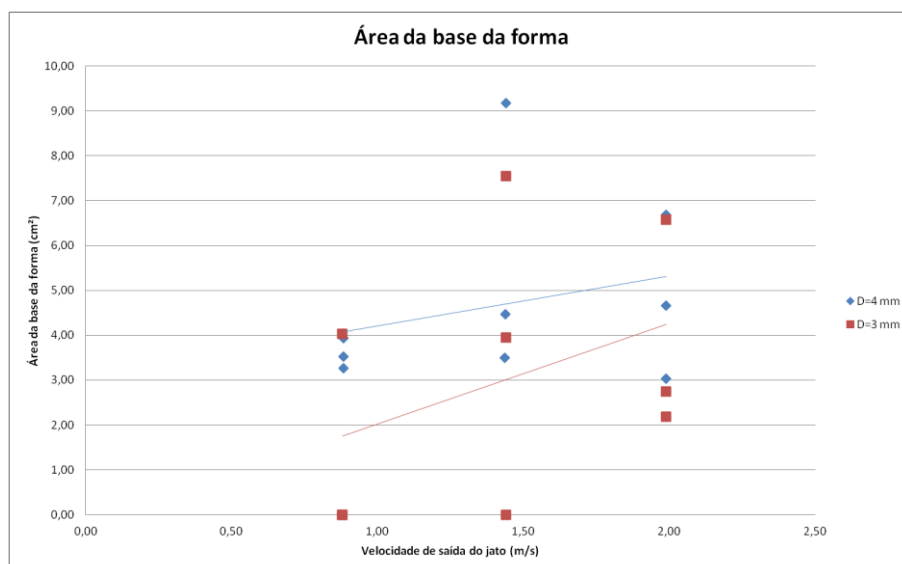
Figura 32 – Influência do diâmetro dos furos de injeção no volume da forma geométrica



(fonte: elaborado pelo autor)

O gráfico da figura 33 mostra a velocidade de saída do jato para cada diâmetro do furo de injeção (eixo das abscissas) versus a área da base da forma geométrica adquirida pela nata (eixo das ordenadas).

Figura 33 – Influência do diâmetro dos furos de injeção na área da base da forma geométrica



(fonte: elaborado pelo autor)

Apesar de grande dispersão, observa-se que em alguns casos a linha de tendência que une os pontos mostra que para o diâmetro maior (4 mm) o volume e a área da base da forma

geométrica solidária à haste de injeção são maiores. Para o volume da forma, para velocidades mais altas as linhas de tendência convergem para o mesmo valor.

7.6 ANÁLISE DAS FORMAS GEOMÉTRICAS EM ESCALA

Nesta seção, foi considerada a análise de modelos reduzidos aplicadas aos ensaios para a determinação do tamanho em escala real das formas geométricas solidárias à haste de injeção. Essa análise está de acordo com o especificado no capítulo 4.

Conforme tabela 1, a escala do experimento é de 1:50. O diâmetro interno das hastes de 6 mm representaria 30 cm em uma estaca torpedo protótipo. Então, o experimento simula em modelo reduzido o equivalente em escala real a um protótipo de estaca torpedo com diâmetro interno de 30 cm.

Já os furos de injeção de 3 e 4 mm representariam, em escala real no protótipo, 15 e 20 cm respectivamente. A tabela 12 apresenta os valores da área da base e do volume da forma geométrica em escala real.

Tabela 12 – Dimensões, volume e área da base em escala real das formas geométricas

Número de identificação	Diâmetro do furo	Nº de furos	Velocidade de saída do jato (m/s)	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Altura (m)	Volume da forma (m ³)	Área da base da forma (m ²)
Injeção 7	4 mm	1	1,99	1,05	0,73	0,43	0,32	0,76
Injeção 8			1,44	1,66	0,68	0,55	0,61	1,12
Injeção 9			0,88	1,18	0,70	0,81	0,66	0,82
Injeção 10		2	1,99	1,81	0,65	0,60	0,69	1,16
Injeção 11			1,44	1,75	0,50	0,28	0,24	0,88
Injeção 12			0,88	1,23	0,72	0,81	0,71	0,88
Injeção 13		4	1,99	2,25	0,75	0,68	1,13	1,67
Injeção 14			1,44	1,75	1,32	0,56	1,27	2,29
Injeção 15			0,88	1,79	0,55	0,25	0,24	0,98
Injeção 16	3 mm	1	1,99	0,98	0,56	1,07	0,58	0,55
Injeção 17			1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Injeção 18			0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Injeção 19		2	1,99	0,98	0,71	0,65	0,45	0,69
Injeção 20			1,44	1,17	0,85	1,28	1,26	0,99
Injeção 21			0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Injeção 22		4	1,99	1,55	1,06	0,55	0,90	1,64
Injeção 23			1,44	1,98	0,96	0,67	1,25	1,89
Injeção 24			0,88	1,31	0,77	0,71	0,71	1,01

(fonte: elaborada pelo autor)

Observa-se que, em escala real, há uma média de aproximadamente 1 m² de área da base da forma geométrica, considerando todas as injeções. Se levado em consideração que, a haste (que simula um protótipo de estaca torpedo de 30 cm de diâmetro) tem área da base de 0,07 m² em escala real, pode-se considerar um aumento de 1.300% na área da base da estaca. Em uma análise preliminar, e considerando a forma geométrica totalmente solidária à haste (estaca), isso seria um excelente ganho de área de ponta da estaca para fundações profundas.

8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo relata as conclusões feitas com os resultados da pesquisa. As mesmas estão divididas de acordo com as variáveis abordadas no trabalho: velocidade de saída do jato de nata, número e diâmetro dos furos de injeção. Também são feitas considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

8.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO JATO DE NATA

Com os resultados do trabalho, pode-se concluir que, ao contrário da hipótese do trabalho, quanto maior a velocidade de saída do jato de nata, maior é o volume e a área da base de um corpo cimentício solidário à haste de injeção.

A velocidade de 1,44 m/s poderia ser considerada a melhor, porém este valor pode estar distorcido em função da dispersão, tendo em vista que este ensaio foi elaborado e executado pela primeira vez na UFRGS.

8.2 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FUROS DE INJEÇÃO

Pode ser concluído que, como esperado, quanto maior o número de furos de injeção, maior é o volume e a área da base de um corpo cimentício solidário à haste de injeção. Deve ser lembrado que, como em todos os ensaios era injetado o mesmo volume de nata por furo, quanto mais furos de injeção, maior volume total de nata injetado.

8.3 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DOS FUROS DE INJEÇÃO

Pôde ser concluído que quanto maior o diâmetro do furo de injeção, maior é o volume e a área da base de um corpo cimentício solidário à haste de injeção. É sugerida uma análise mais aprofundada variando em maior magnitude o diâmetro do furo de injeção.

8.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

É sugerida, para o aperfeiçoamento do ensaio e ampliação do conhecimento sobre o assunto, a realização de mais ensaios. A metodologia de ensaio pode ainda ser aperfeiçoada, com a inclusão de novos equipamentos, materiais ou até mesmo uma nova concepção de ensaio. Também podem ser feitos novos ensaios com maior escala, ou seja, no tamanho de um protótipo. Para dar sequencia a esta pesquisa, é necessária a execução de ensaios de arrancamento após a injeção para avaliar a influência da injeção de nata no desempenho da estaca.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a.

_____. **NBR 7181**: solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.

_____. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

AUBENY, C. P.; MURFF, J. D.; ROSSET, J. M. Geotechnical issues in deep and ultra deep waters. **The International Journal of Geomechanics**, [Reston], v. 1, n. 2, p. 225-247, Apr. 2001.

BRUM JR., S. A.; SABOYA JÚNIOR, F.; TIBANA, S.; REIS, R. M.; RAMIRES SOBRINHO, R.; VIEIRA, J.; DEL'AGUILA, V. M. Performance of torpedo piles using scaled models in geotechnical centrifuge. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado. **Resumos...** [S. l.: s. n.], 2010. Não paginado.

CARLETTO, M. F. W. **Jet grouting (sistema monofluido)**: um método teórico simplificado para a previsão do diâmetro das colunas. 2009. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, F. L. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1993.

DELMAR SYSTEMS, INC., **Suction anchor**. Broussard, 2014. Disponível em: <<http://www.delmarus.com/site88.php>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2000.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2002.

INTERMOOR, **Ancoras SEPLA**. Houston, 2014. Disponível em: <<http://www.intermoor.com/pt/servi-os-503/ancoragem-504/ancoras-sepla-528>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

JUNG, J. G. **Estudo do jateamento em solos argilosos e sua aplicação à engenharia de fundações offshore**. 2012. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2012.

MEDEIROS JÚNIOR., C. J. Torpedo anchor for deep water. In: DEEP WATER OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2001, Rio de Janeiro. **Resumos...** [S. l.: s. n.], 2001. Não paginado.

MEZZOMO, S. M. **Estudo dos mecanismos de fluidização de areias com a utilização de jatos de água**. 2009. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

O'LOUGHLIN, C. D.; RANDOLPH, M. F.; RICHARDSON, M. Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2004, Houston. **Resumos...** [S. l.: s. n.], 2004, p. 1-11.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., **Exploração e produção de petróleo e gás**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

SHARMA, P. P. B. S. **Ultimate capacity of suction caisson in normally and lightly overconsolidated clays**. 2004. 149 f. Thesis (Master of Science), Texas A&M University, College Station, 2004.

STRACKE, F. **Fluidização de solo arenoso associada à injeção de agente cimentante para ancoragem de estruturas offshore**. 2012. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

THE BRUCE ANCHOR GROUP, **The bruce DENNLA mk 4**. Douglas, 2014. Disponível em: <http://www.bruceanchor.co.uk/Dennla_new_Mk4.html>. Acesso em: 11 mar. 2014.

VALDIR GEREMIA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA., **VGF e VGX - Linha Industrial**. São Leopoldo, 2014. Disponível em: <<http://www.valge.com.br/vgf.html>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

VRYHOF ANCHORS B.V. **Anchor Manual 2010: the guide to anchoring**. 4. ed. Capelle aan den IJssel, 2010. Disponível em: <http://www.vryhof.com/anchor_manual.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2014.

APÊNDICE – Fotos e dimensões das formas geométricas

Figura A1 – Injeção 7 – medidas em cm

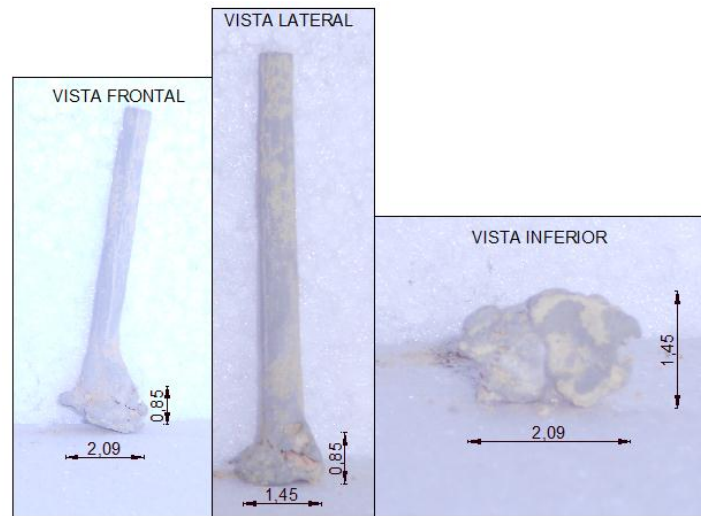


Figura A2 – Injeção 8 – medidas em cm

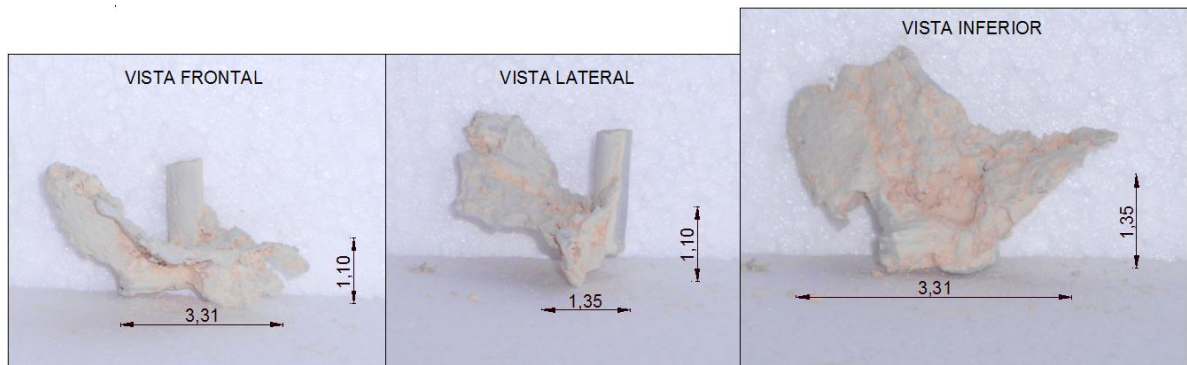


Figura A3 – Injeção 9 – medidas em cm

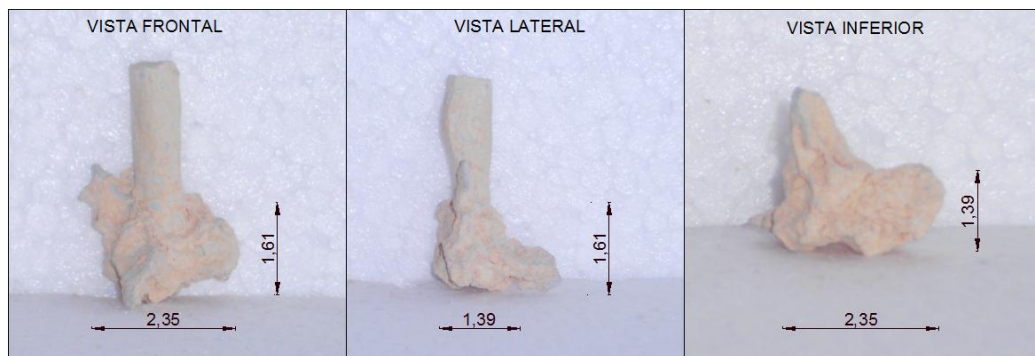


Figura A4 – Injeção 10 – medidas em cm

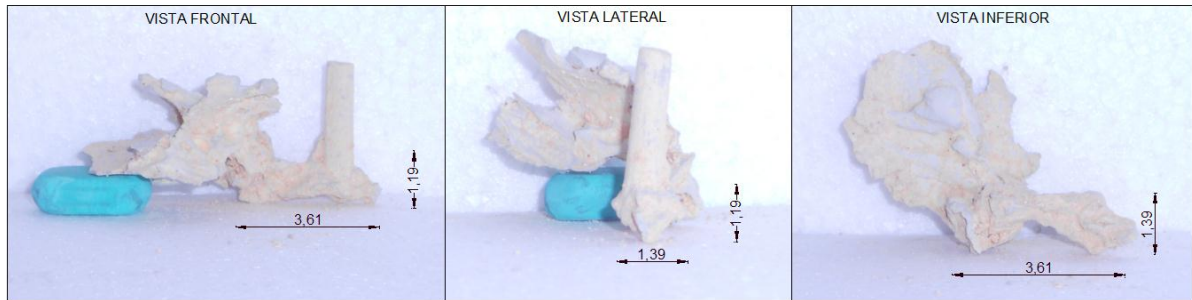


Figura A5 – Injeção 11 – medidas em cm

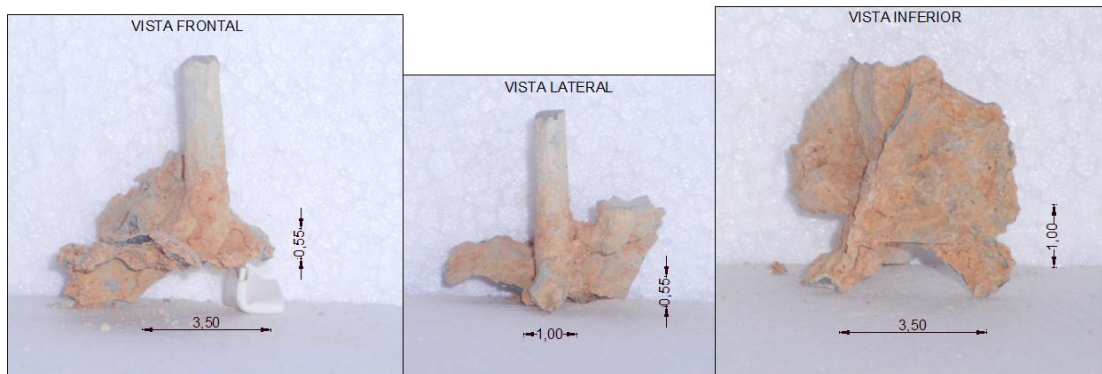


Figura A6 – Injeção 12 – medidas em cm

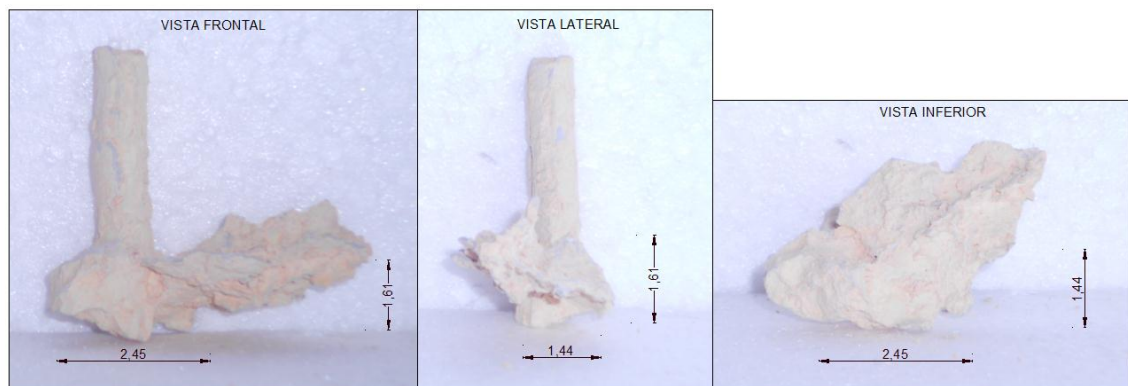


Figura A7 – Injeção 13 – medidas em cm



Figura A8 – Injeção 14 – medidas em cm

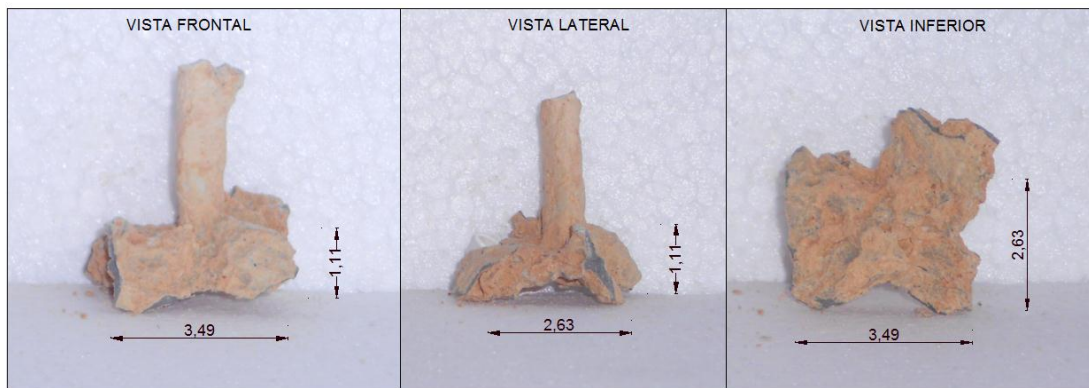


Figura A9 – Injeção 15 – medidas em cm

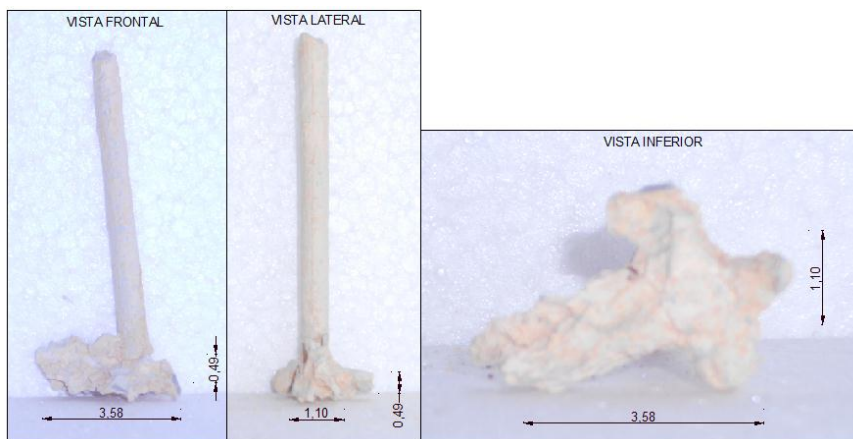


Figura A10 – Injeção 16 – medidas em cm

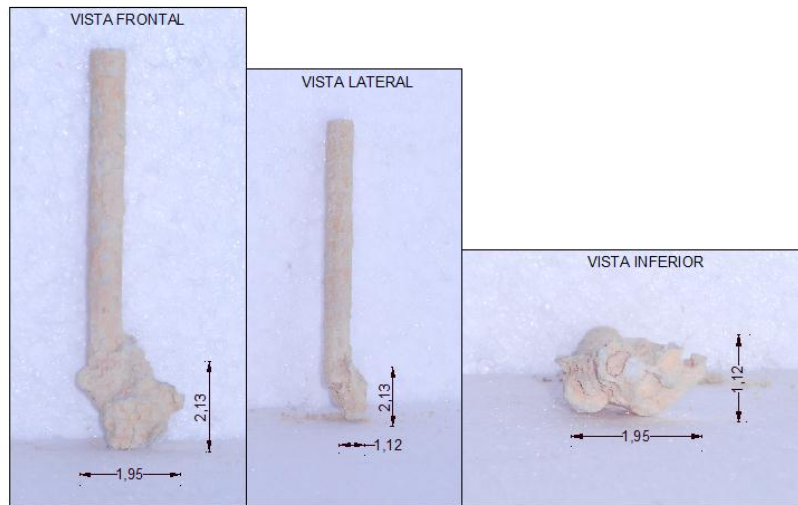


Figura A11 – Injeção 19 – medidas em cm

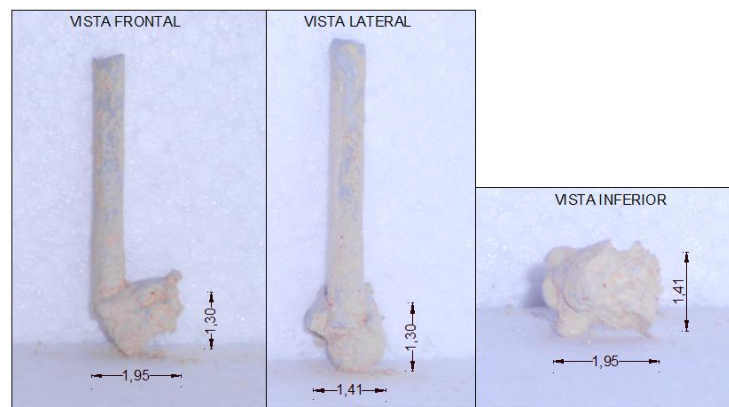


Figura A12 – Injeção 20 – medidas em cm

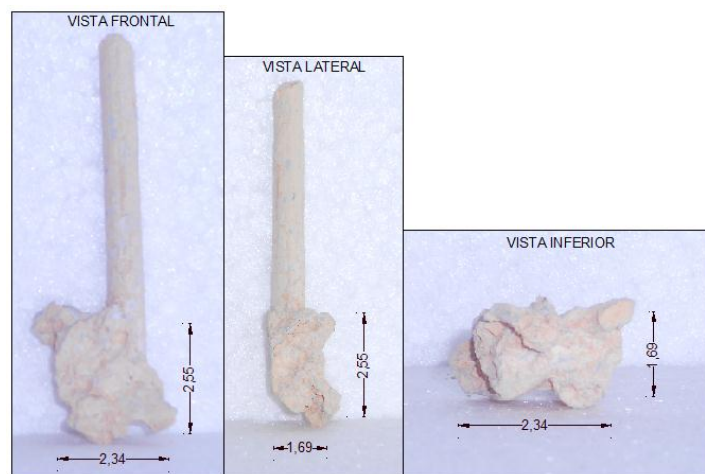


Figura A13 – Injeção 22 – medidas em cm

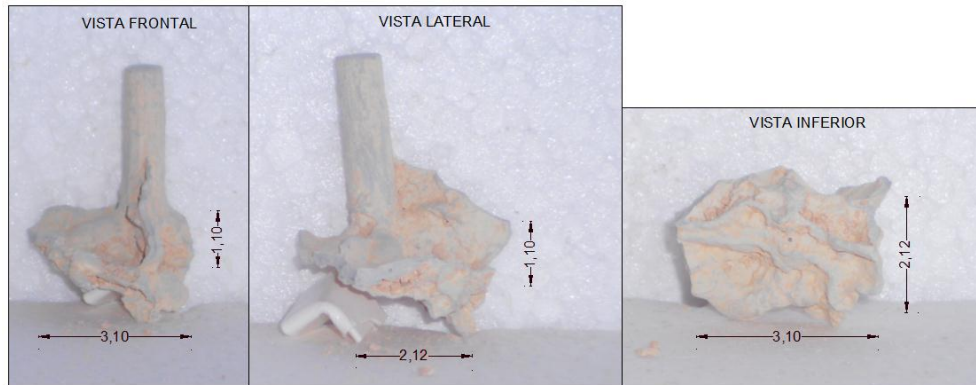


Figura A14 – Injeção 23 – medidas em cm

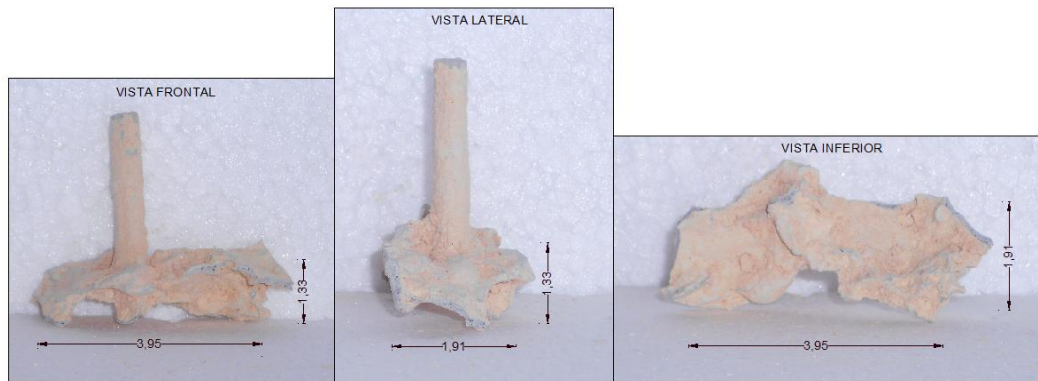


Figura A15 – Injeção 24 – medidas em cm

