

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

**Cleber de Freitas Floriano**

**SOLO GRAMPEADO: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE  
ANÁLISES NUMÉRICAS COM DADOS DE  
MONITORAMENTO**

Porto Alegre

Julho 2009

**CLEBER DE FREITAS FLORIANO**

**SOLO GRAMPEADO: COMPARAÇÃO ENTRE  
RESULTADOS DE ANÁLISES NUMÉRICAS COM DADOS DE  
MONITORAMENTO**

Trabalho de Diplomação 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: Adriano Virgílio Damiani Bica**

Porto Alegre

julho 2009

**CLEBER DE FREITAS FLORIANO**

**SOLO GRAMPEADO: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE  
ANÁLISES NUMÉRICAS COM DADOS DE  
MONITORAMENTO**

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, 14 de julho de 2009

Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica  
PhD pela University of Surrey  
Orientador

Prof. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)**  
PhD pela University of London

**MSc. Marcos Strauss (Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda.)**  
MSc pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica (UFRGS)**  
PhD pela University of Surrey

Dedico este trabalho a meus pais, Cleber e Claire, que sempre estiveram e estarão ao meu lado e especialmente ao amor da minha vida, companheira e colega Patrícia.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu professor orientador, Adriano Bica, pela dedicação, preocupação e determinação comigo e com o trabalho. O professor Bica está além de um orientador, pois compreende e solidariza quaisquer dificuldades do trabalho e da vida particular. Sem o professor Bica não seria possível realizar este trabalho.

Agradeço a professora Carin, nossa homenageada, pela orientação de como realizar, de fato, um trabalho científico. O conhecimento que nos deste será utilizado por toda nossa vida profissional.

Agradeço a todos da empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia, em especial ao MSc Marcos Strauss por transmitir, de uma maneira amigável e muitas vezes divertida, com paciência e dedicação, os ensinamentos da prática de projetos geotécnicos; ao professor MSc Eduardo Azambuja, uma fonte de conhecimento inesgotável; ao professor Eng. Marco Aurélio Azambuja pelos conselhos profissionais e de vida; ao Eng. Cleomar pelas dicas nas análises numéricas deste trabalho. Minha formação profissional deve muito a vocês todos.

Agradeço a todo o apoio, incentivo e orientação do genial professor Luiz Bressani.

Agradeço ao Doutorando Felipe Gobbi pelas dicas e pelo fornecimento de todo material de sua dissertação para que eu pudesse utilizar neste trabalho.

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma ajudaram-me neste trabalho, destacando professores e colegas da UFRGS.

Agradeço a todos os colegas geotécnicos da Universidade do Porto, em especial ao Zé, Contente e o Coutinho.

Agradeço a família pelo amor, apoio, fortaleza e o acolhimento que me fez mais forte. Vocês sempre foram os meus escudos.

Agradeço a minha noiva Patrícia pelo amor, cumplicidade e o compartilhamento diário da minha vida de estudante de engenharia. Enfrentamos e enfrentaremos juntos todos os obstáculos de nossas vidas! Te amo muito!

Por fim, agradeço a Deus pela existência.

Os problemas significativos que enfrentamos não podem  
ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que  
estávamos quando os criamos

*Albert Einstein*

## RESUMO

FLORIANO, C. F. **Solo Grampeado: comparação entre resultados de análises numéricas com dados de monitoramento.** 2009. n. f. 100. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Neste Trabalho de Diplomação estudou-se o sistema em solo grampeado utilizado como estrutura de contenção em uma obra de escavação que compõe a construção da Terceira Perimetral da cidade de Porto Alegre/RS. Este tipo de estrutura é projetado geralmente por formulações baseadas nos métodos de equilíbrio limite, os quais consideram apenas o estado limite de ruptura, sem considerar os deslocamentos envolvidos durante o processo. Desta maneira, não permitem avaliações quanto à deformabilidade do sistema em um todo. O trabalho propôs, então, a realização de análises numéricas, fundamentadas pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando modelos elástico linear e elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Estas análises foram realizadas através do programa computacional PLAXIS. Após, foram comparadas com os dados de monitoramento do deslocamento desta obra. Na revisão bibliográfica descrevem-se as considerações do projeto da obra, enfatizando o dimensionamento da estrutura. Descrevem-se, também, os parâmetros utilizados nas análises que foram obtidos de pesquisas progressas desenvolvidas nesta universidade. Parte destes dados é apresentada neste trabalho, além de alguns itens importantes referentes ao sistema em solo grampeado. Na maior parte das escavações desta obra encontrou-se o solo residual do Gnaisse Porto Alegre (SRGPA). Este solo tem textura e comportamento mecânico anisotrópicos. Após a escolha de uma seção transversal representativa no contexto deste trabalho, foram realizadas doze análises numéricas variando os parâmetros e elementos de projeto. Os resultados indicaram que os deslocamentos verificados numericamente se compatibilizam com os monitorados em obra tendo em consideração a forte anisotropia do comportamento geomecânico.

Palavras-chave: solo grampeado; comportamento geomecânico; solo residual de gnaisse; anisotropia.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: desenho esquemático da pesquisa.....	20
Figura 2: gráfico da carga de ruptura de grampos sem injeção e com injeção de nata de cimento .....	24
Figura 3: desenho esquemático dos elementos do grampo.....	24
Figura 4: principais modos de ruptura de um sistema de solo grampeado .....	25
Figura 5: bandamento de uma estrutura gnáissica.....	33
Figura 6: estrutura gnáissica do SRGPA .....	36
Figura 7: envoltórias de resistência ao cisalhamento do SRGPA superior, obtidas de amostra com a xistosidade paralela e perpendicular à superfície de ruptura e de amostras reconstituídas .....	38
Figura 8: curvas de deformação axial versus tensão desvio para os ensaios IC nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200kPa.....	42
Figura 9: curvas de deformações axial versus módulos de deformabilidade secante para os ensaios IC nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200 kPa.....	42
Figura 10: curvas de deformação axial versus tensão desvio para os ensaios IV nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200kPa.....	43
Figura 11: curvas de deformações axial versus módulos de deformabilidade secante para os ensaios IV nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200 kPa.....	44
Figura 12: gráfico dos ciclos de carga em um ensaio de arrancamento de grampos .....	50
Figura 13: deslocamentos horizontais da parede 2 em função do tempo .....	54
Figura 14: seções típicas, quanto à formação geológica, encontradas nas escavações da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral .....	55
Figura 15: pontos onde foram realizados o controle e a instrumentação da obra e a posição de escolha da seção transversal para estudo. As letras nesta figura representam os pontos de monitoramento topográfico, enquanto os números representam os locais de ensaio de arrancamento de grampos. Também estão indicados os locais onde foram retirados os blocos de amostras indeformadas.....	56
Figura 16: seção transversal típica nos pontos mais críticos considerados pelo projeto da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral .....	57
Figura 17: seção transversal reforçada após a observação de trincas de tração à montante da escavação .....	57
Figura 18: gráfico representativo da variação do módulo de deformabilidade na condição de descarregamento lateral com a profundidade. ....	59
Figura 19: Interpolação das curvas tensão-deformação do ensaio triaxial para obtenção da tensão confinante de referência de 100 kPa, tomando como exemplo os resultados do ensaio IC .....	60
Figura 20: geometria e malha de elementos finitos utilizadas nas análises pelo programa PLAXIS .....	62



Figura 21: comparação entre resultados típicos de ensaios triaxiais (a) com as curvas do modelo elástico perfeitamente plástico (b).....	66
Figura 22: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IC.....	76
Figura 23: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IV.....	77
Figura 24: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IC com reforços.....	77
Figura 25: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IV com reforços.....	78
Figura 26: deformada da estrutura em solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC.....	79
Figura 27: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IC.....	79
Figura 28: deformada da estrutura em solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IV.....	80
Figura 29: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IV.....	80
Figura 30: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços.....	81
Figura 31: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços.....	81
Figura 32: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços.....	82
Figura 33: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços.....	82
Figura 34: deformada da estrutura em solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA conforme a deformação de cisalhamento mobilizada.....	83
Figura 35: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede para a análise elástica perfeitamente plástica IC com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA conforme a deformação de cisalhamento mobilizada.....	84
Figura 36: pontos de plastificação do SRGPA determinados pela análise elástica perfeitamente plástica IC com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA conforme a deformação de cisalhamento mobilizada.....	84
Figura 37: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada.....	85
Figura 38: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento.....	85

Figura 39: pontos de plastificação do SRGPA para a análise elástica perfeitamente plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada.....	86
Figura 40: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada .....	86
Figura 41: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento .....	87
Figura 42: pontos de plastificação do SRGPA para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada. ....	87
Figura 43: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada. ....	88
Figura 44: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica e perfeitamente plástica IV com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento. ....	88
Figura 45: pontos de plastificação do SRGPA para a análise elástica e perfeitamente plástica IV com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada. ....	89
Figura 46: forma típica da distribuição de carga axial no grampo calculada pelo programa PLAXIS (considerado neste tipo de análise como elemento do tipo geogrelha) ..	90
Figura 47: gráfico das tensões de arrancamento médias, $\tau_g$ , em cada linha de grampo, calculadas a partir dos resultados das análises com o programa PLAXIS .....	91
Figura 48: valores dos deslocamentos horizontais calculados pelas análises realizadas com o programa PLAXIS com os valores experimentais determinados pelo monitoramento da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral (valores de deslocamentos expressos em cm). ....	93
Figura 49: valores de resistência ao arrancamento $q_s$ (kPa), determinados nos ensaios de arrancamento de grampos protótipos, em função da profundidade (m). ....	95

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	sequência construtiva didática de um sistema em solo grampeado.....	22
Quadro 2:	valores típicos de $q_s$ citados na literatura geotécnica e os determinados para a obra estudada neste trabalho .....	27
Quadro 3:	parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss obtidos a partir de envoltórias com ajuste linear .....	37
Quadro 4:	parâmetros geotécnicos para a zona de subsolo .....	48
Quadro 5:	parâmetros geotécnicos obtidos nas investigações complementares.....	49
Quadro 6:	resultados dos ensaios de arrancamento de grampos.....	51
Quadro 7:	resumo dos parâmetros geotécnicos do SRGPA .....	52
Quadro 8:	parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IC .....	67
Quadro 9:	parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IV.....	68
Quadro 10:	parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IC com reforços.....	69
Quadro 11:	parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IV com reforços.....	70
Quadro 12:	parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IC com correção dos módulos.....	71
Quadro 13:	parâmetros dos elementos const. da análise IV com correções dos módulos .....	72
Quadro 14:	parâmetros de dados de entrada dos elementos constituintes da análise IC com reforços e correção dos módulos.....	73
Quadro 15:	parâmetros de dados de entrada dos elementos constituintes da análise IV com reforços e correção dos módulos.....	74
Quadro 16:	Resumo dos valores das tensões de arrancamento médias dos grampos, $\tau_g$ , calculados a partir dos resultados das análises realizadas com o PLAXIS.....	90
Quadro 17:	resumo dos valores da carga axial máxima de arrancamento dos grampos $T_{max}$ e dos comprimentos de ancoragem $L_a$ , ambos calculados a partir dos resultados das análises com o programa PLAXIS.....	91
Quadro 18:	Fatores de segurança relativos $FS = q_s(\text{ensaios})/\tau_g(\text{plaxis})$ .....	94
Quadro 19:	fatores de segurança relativos a tração no grampo $FS = T_{\text{trab}}/T_{\text{max}}(\text{plaxis})$ .....	95
Quadro 20:	comprimento das bacias de deformações para as diferentes análises.....	96

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	<b>17</b>
2.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
2.2	HIPÓTESE.....	17
2.3	OBJETIVO PRINCIPAL.....	17
2.4	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	17
2.5	PROSSUPOSTOS.....	18
2.6	DELIMITAÇÕES.....	18
2.7	LIMITAÇÕES.....	18
2.8	DELINEAMENTO.....	19
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA EM SOLO GRAMPEADO</b> .....	<b>21</b>
3.1	ORIGEM DO SISTEMA DE SOLO GRAMPEADO.....	21
3.2	SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA.....	22
3.3	ELEMENTO GRAMPO.....	23
3.4	COMPORTAMENTO COMO ESTRUTURA DE CONTENÇÃO.....	25
3.5	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	28
<b>3.5.1</b>	<b>Estabilidade Interna</b> .....	<b>28</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Estabilidade Externa</b> .....	<b>29</b>
3.6	VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	30
<b>4</b>	<b>SOLO RESIDUAL DE GNAISSE</b> .....	<b>32</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE.....	32
4.2	SOLO RESIDUAL DO GNAISSE PORTO ALEGRE.....	34
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização e Mineralogia</b> .....	<b>35</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Ensaio de Cisalhamento Direto e <i>Ring Shear</i></b> .....	<b>36</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Ensaio triaxiais</b> .....	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO ESTUDADO</b> .....	<b>45</b>
5.1	GEOLOGIA LOCAL.....	45
5.2	CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO.....	45
5.3	SISTEMA CONSTRUTIVO.....	46
5.4	DIMENSIONAMENTO.....	47

5.5	CONTROLE TECNOLÓGICO .....	49
5.5.1	Ensaio de Arrancamento de Grampos .....	49
5.5.2	Deslocamentos da crista .....	51
5.5.3	Resumo dos Parâmetros Geotécnicos .....	51
6	ESCOLHA DA SEÇÃO TRANSVERSAL ANALISADA .....	53
7	ANÁLISE COMPUTACIONAL .....	58
7.1	MODELO NUMÉRICO .....	58
7.1.1	Parede de Concreto Projetado .....	62
7.1.2	Grampos e Reforços .....	63
7.1.3	Parâmetros geotécnicos do SRGPA .....	65
7.2	ANÁLISE IC .....	66
7.3	ANÁLISE IV .....	67
7.4	ANÁLISE IC COM REFORÇOS .....	68
7.5	ANÁLISE IV COM REFORÇOS .....	69
7.6	CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IC .....	70
7.7	CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IV .....	71
7.8	CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IC COM REFORÇOS .....	72
7.9	CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IV COM REFORÇOS .....	73
8	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	75
8.1	ANÁLISES ELÁSTICAS LINEARES .....	75
8.2	ANÁLISES ELÁSTICAS PERFEITAMENTE PLÁSTICAS .....	78
8.3	ANÁLISE COM CORREÇÃO DOS MÓDULOS .....	83
8.4	ANÁLISE DAS CARGAS AXIAIS NOS GRAMPOS .....	89
9	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	92
10	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	97
	REFERÊNCIAS .....	99

## 1 INTRODUÇÃO

Solo grampeado é uma técnica para melhoria da resistência ao cisalhamento do solo aplicada aos maciços de geometria instável e taludes de estabilidade insatisfatória. Do ponto de vista prático, trata-se de um conjunto de barras de aço simplesmente cravadas ou colocadas através de um furo no solo e envolvidas por uma camada de nata de cimento injetada. Estes elementos são conhecidos como **grampos** ou, muitas vezes chamados de **chumbadores**. Executa-se, complementarmente, um faceamento geralmente de concreto projetado e, quando necessário, um sistema de drenagem de contato.

Este tipo de sistema de contenção muitas vezes pode ser economicamente viável em comparação, por exemplo, com cortinas atirantadas ou paredes diafragma e até mesmo apresentar melhor comportamento funcional. Porém, o seu comportamento mecânico como sistema de contenção não tem ainda uma compreensão totalmente clara para a comunidade geotécnica, havendo ainda muitas dúvidas relativas aos métodos de análise e projeto. A principal dúvida dos projetistas destas estruturas é o quanto estas se deformam. Geralmente a análise de estabilidade é realizada através de métodos de equilíbrio limite (equilíbrio de forças e momentos) onde não é possível determinar as deformações do maciço.

Por outro lado, na Engenharia Civil, exige-se, cada vez mais, que as técnicas de projeto sejam mais precisas mediante a realidade de prazos e custos das obras. Dentro deste contexto, o desenvolvimento tecnológico na área da informática auxiliou bastante o aperfeiçoamento das técnicas de projeto, principalmente com o surgimento de computadores capazes de realizar cálculos iterativos com velocidade satisfatória. Assim, pode-se usufruir do recurso de métodos numéricos com relativa facilidade; dentre os métodos mais usuais está o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Atualmente, o MEF tornou-se uma ferramenta de uso comum para análise de projetos quando os materiais envolvidos têm o seu comportamento mecânico conhecido e bem definido como o concreto, por exemplo. Porém, quando se trata de solos, geralmente não se pode pensar em materiais com propriedades físicas bem definidas, pois existe uma grande variabilidade no seu comportamento mecânico (consistem geralmente de materiais com comportamento mecânico elastoplástico, anisotrópico e heterogêneo). Portanto, para tais materiais, uma investigação

mais criteriosa dos parâmetros geomecânicos envolvidos nas análises pelo MEF deve ser feita a cada caso.

Neste trabalho foi estudada uma obra específica, onde se utilizou a técnica de solo grampeado. A obra se localiza na cidade de Porto Alegre, atendendo à necessidade de contenção de uma escavação em solo residual de gnaiss, na construção de uma passagem de nível entre as avenidas Tarso Dutra e Protásio Alves. Esta obra é composta por quatro viadutos e uma passagem inferior. Os taludes de corte verticais atingiram até 11 m de profundidade.

Para que se tenha possibilidade de realizar um estudo consistente desta estrutura de solo grampeado, foi necessário o conhecimento aprofundado do comportamento mecânico, das características físicas do solo envolvido e das técnicas de projeto e execução da obra realizada pelos projetistas. Sendo assim, obtiveram-se informações sobre a investigação geotécnica do maciço de solo onde foi realizada a obra, através de ensaios de sondagem à percussão (SPT), ensaios de penetração de cone (CPT) e ensaios de laboratório.

Observada a complexidade do comportamento deste solo, surgiram vários estudos complementares ao projeto, incluindo outros ensaios de laboratório realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Desta forma, criou-se um vasto banco de dados. Constatou-se, então, que, na maior parte da obra, encontra-se o solo residual da formação geológica denominada de Gnaiss Porto Alegre. A característica principal deste solo é a variabilidade na sua resistência ao cisalhamento conforme a orientação do plano de cisalhamento. Isso ocorre devido à existência de bandeamentos oriundos da rocha matriz (gnaiss) (BERNARDES, 2003; GOBBI, 2005).

Com o projeto da obra em mãos e os conhecimentos exigidos para uma boa compreensão do comportamento mecânico de uma estrutura em solo grampeado, foi possível realizar análises computacionais através do MEF e determinar os deslocamentos da estrutura. Também foi possível, a seguir, comparar estes deslocamentos calculados com os dados reais obtidos do monitoramento da estrutura e interpretá-los.

Para efetuar este estudo, buscou-se o projeto executivo da estrutura em solo grampeado realizado no ano de 2000, fornecido pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda., que também forneceu os dados de monitoramento dos deslocamentos da estrutura em solo

grampeado e os resultados de ensaios de arrancamento de grampos realizados durante a construção e utilização da obra.

Partindo do fato que não existe normalização brasileira para obras de contenções ou especificamente estruturas em solo grampeado, torna-se importante o conhecimento mais aprofundado das limitações dos métodos de solução de problemas utilizados atualmente dentro do contexto de projeto de estruturas em solo grampeado. Principalmente, porque estas estruturas geralmente apresentam bom desempenho geotécnico, praticidade na construção e, muitas vezes, tornam-se a solução mais viável em muitas obras. Porém, são projetadas e executadas considerando margens de erro relativamente grandes.

Esta pesquisa foi realizada com o intuito de possibilitar que a comunidade científica geotécnica e as empresas de projeto e construção da área de geotecnia a utilizem como fonte de consulta para futuros estudos ou projetos em estruturas em solo grampeado. Sendo assim, os interessados podem, também, efetuar comparações com estruturas de contenção de mesma funcionalidade como, por exemplo: paredes diafragma e cortinas atirantadas.

Quanto aos motivos que levaram à realização desta pesquisa, estes podem ser separados em pessoais e comunitários. Dentre os motivos pessoais, dizem respeito (i) à ampliação dos conhecimentos sobre a aplicação de um método numérico avançado a um problema prático, através do programa computacional PLAXIS, o qual, como já citado, está cada vez sendo mais difundido na Engenharia Geotécnica, (ii) obter conhecimento mais aprofundado sobre o comportamento do solo em estruturas de contenção do tipo solo grampeado e (iii) adquirir conhecimento mais aprofundado sobre as técnicas de projeto e construção de estruturas em solo grampeado. Já os motivos comunitários resumem-se na contribuição para a obtenção de maior precisão em projetos de estruturas em solo grampeado, possivelmente introduzindo novas considerações aos métodos de cálculo atuais e, conseqüentemente, reduzindo custos.

Este Trabalho de Diplomação está estruturado em 10 capítulos, sendo este o primeiro. O capítulo 2 descreve o método de pesquisa utilizado no trabalho. No capítulo 3 está apresentada a descrição da técnica em solo grampeado, suas vantagens, desvantagens e o mecanismo de funcionamento do sistema. O capítulo 4, por sua vez, mostra o estudo do solo aplicado a este trabalho e, ainda, no capítulo 5 apresentam-se as principais considerações do projeto estudado para fins de análise deste trabalho. Estes três últimos capítulos formam a revisão bibliográfica.



A seção transversal do projeto, criteriosamente escolhida para as análises descritas neste trabalho, está apresentada no capítulo 6. Já as considerações referentes a estas análises estão descritas no capítulo 7.

Os capítulos 8 e 9 apresentam os resultados e as discussões destas análises, respectivamente. Finalmente, o capítulo 10 apresenta as conclusões e sugestões deste Trabalho de Conclusão de Curso.

## 2 MÉTODO DE PESQUISA

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais os resultados da comparação entre os deslocamentos reais da estrutura em solo grampeado em estudo, com os resultados de análises numéricas realizadas através do método dos elementos finitos?

### 2.2 HIPÓTESE

É hipótese deste trabalho que os deslocamentos verificados numericamente são compatíveis com os deslocamentos reais da obra.

### 2.3 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal da pesquisa é a comparação entre os dados obtidos pelo monitoramento de uma obra real, em plena utilização, com análises numéricas realizadas através do método dos elementos finitos.

### 2.4 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

São objetivos secundários:

- a) avaliação do comportamento mecânico do solo, dos grampos e desta estrutura de contenção como um todo;
- b) descrição das técnicas de projeto e execução aplicadas, hoje, para estruturas de solo grampeado e eventuais comparações com as utilizadas na obra em estudo;

- c) descrição das considerações de utilização e aplicação dos modelos numéricos utilizados, avaliando seus resultados.

## 2.5 PRESSUPOSTOS

São pressupostos deste trabalho que:

- a) os valores obtidos do monitoramento dos deslocamentos da obra representam os seus deslocamentos reais;
- b) os ensaios de laboratório do solo residual de gnaiss, apresentados em duas dissertações na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), descrevem com exatidão o comportamento mecânico deste solo;
- c) os resultados dos ensaios de arrancamento de grampos, não instrumentados, descrevem com exatidão a resistência última de aderência dos grampos em relação ao solo;
- d) os dados de dimensionamento da estrutura em solo grampeado, assim como os materiais e informações técnicas de execução, foram executados como descrito em projeto.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se ao estudo de: uma estrutura em solo grampeado, construída na cidade de Porto Alegre, realizada com escavações em solo residual de gnaiss.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) análise de apenas uma seção da estrutura, a que se denominará mais representativa;
- b) não foi realizado nenhum tipo de ensaio de laboratório adicional, apenas foram interpretados os ensaios já realizados;

- c) os ensaios de arrancamento de grampos, utilizados neste trabalho, não são instrumentados ao longo do comprimento com medidores de deformação (*strain-gauges*);
- d) utilizou-se, para a resposta do comportamento mecânico do solo residual de gnaisse, os modelos constitutivos elástico perfeitamente plástico e linear elástico;
- e) as análises pelo MEF foram realizadas somente com um programa computacional (PLAXIS).

## 2.8 DELINEAMENTO

A figura 1 apresenta o desenho esquemático do desenvolvimento da pesquisa, e que pode ser descrito, sequencialmente, da seguinte maneira:

- a) o estudo iniciou-se com uma avaliação do comportamento mecânico do solo residual do Gnaisse Porto Alegre. Este solo compõe as seções de corte e escavação da maior parte da obra da Terceira Perimetral. Através do projeto da obra e das publicações de estudos complementares sobre este solo foi possível obter seus parâmetros geotécnicos e geomecânicos;
- b) através do projeto da obra e outras publicações sobre estruturas em solo grampeado, efetuou-se o estudo das técnicas de projeto e execução dessas estruturas para, assim, obter as devidas considerações de projeto referentes a dimensões, tipos de materiais, sequência construtiva, etc;
- c) posteriormente realizou-se um estudo sobre o programa computacional utilizado – no caso, o programa PLAXIS, fundamentado no MEF – e sua aplicabilidade em projetos de estruturas em solo grampeado;
- d) obtendo-se as informações e parâmetros de cálculo necessários, foi possível efetuar a entrada de dados no programa PLAXIS juntamente com as demais considerações de projeto;
- e) com os resultados das análises numéricas da estrutura em solo grampeado e com os dados reais do monitoramento, foi possível compará-los;
- f) por fim, foram obtidas as conclusões sobre esta comparação.

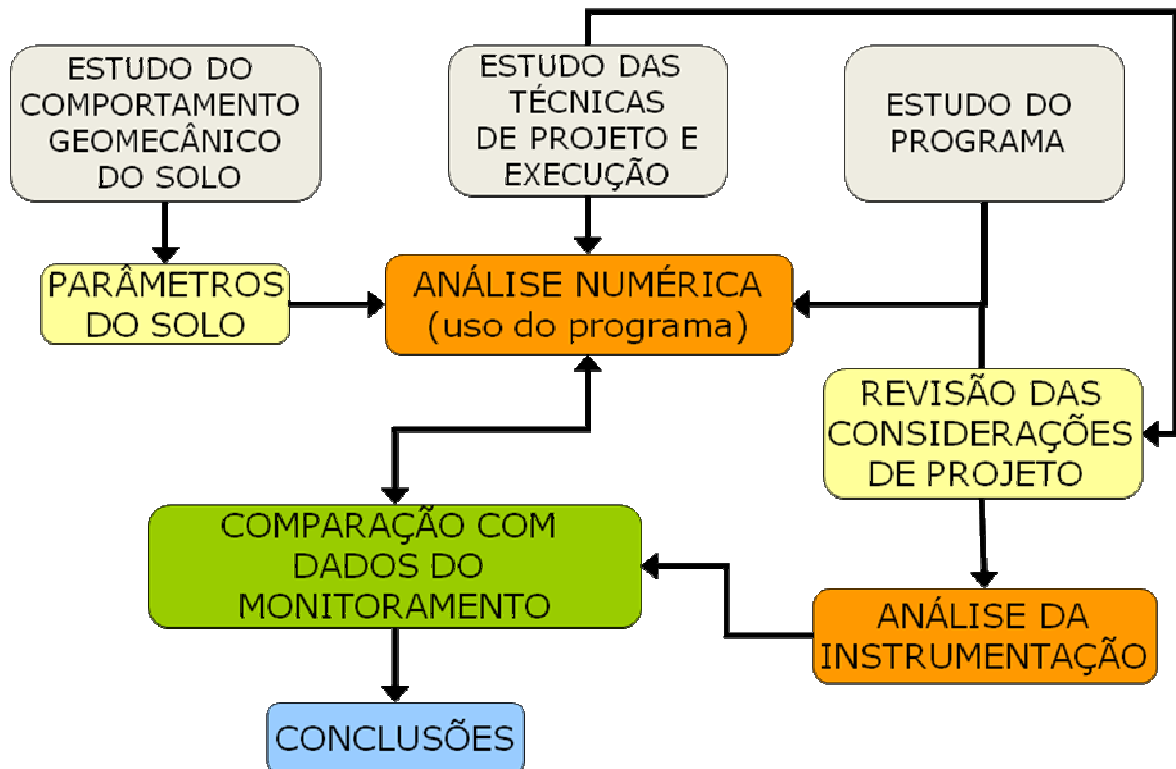


Figura 1:desenho esquemático da pesquisa.

### 3 ESTRUTURA EM SOLO GRAMPEADO

Neste capítulo mostra-se um breve histórico do sistema em solo grampeado, seu comportamento mecânico como estrutura de contenção, a sequência construtiva e suas vantagens e desvantagens. Os detalhes construtivos e tipos de materiais utilizados são descritos em maior detalhe no Capítulo 5 deste trabalho, tendo como referência o projeto executivo da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral.

#### 3.1 ORIGEM DO SISTEMA EM SOLO GRAMPEADO

A origem da técnica em solo grampeado está, em parte, numa técnica de suporte de escavação em túneis, denominada NATM (*New Austrian Tunneling Method*). Após a aplicação bem sucedida da técnica NATM em rochas duras, outras experiências foram efetuadas em rochas brandas e finalmente em solos, levando o nome de solo grampeado ou pregado (*soil nailing*, em inglês; *clouage du sol*, em francês).

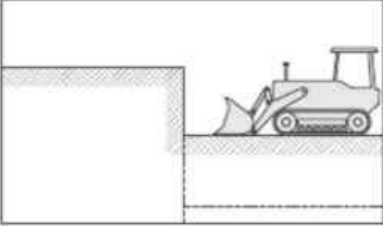
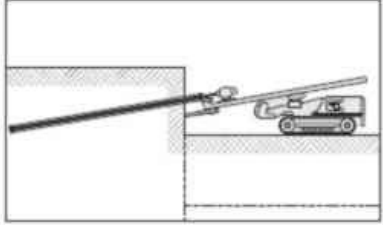
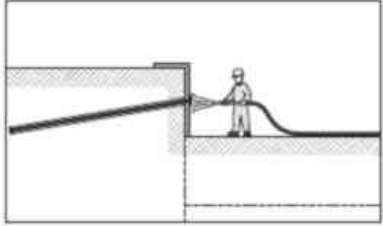
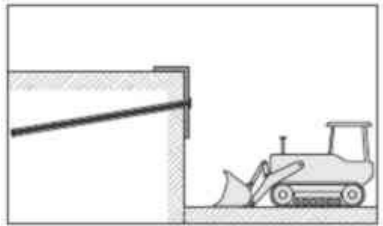
Especificamente a técnica em solo grampeado foi usada pela primeira vez na França, em 1961, como solução de contenção para um talude. Porém, não foi realizada a aplicação de concreto projetado. Em Versailles, 1972, a face de um talude de aproximadamente 18 m de altura, foi grampeada e também aplicada a técnica de injeção de concreto. A partir de então, países como França, Alemanha, Canadá, Grã-Bretanha e outros, apresentaram diversas publicações sobre a utilização do sistema em solo grampeado. Porém foi na França, em 1986, que o governo deste país financiou um projeto de pesquisas de grande orçamento denominado CLOUTERRE com o objetivo de sistematizar recomendações e normalizações para o projeto e construção de estruturas em solo grampeado. Este projeto foi difundido pelo mundo e ainda é de grande utilidade para projetistas de sistemas em solo grampeado (LOZANO e PAIAS, 2006).

No Brasil, grande parte da experiência em solos grampeados foi publicada no manual técnico de estabilização de taludes da GeoRio (1999) e em dois encontros promovidos pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) em São Paulo. Neste último encontro,

foi publicado o artigo de Azambuja et al. (2003), uma das publicações que fundamentaram a pesquisa deste trabalho de diplomação.

### 3.2 SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA

Na maioria dos casos, a técnica de solo grampeado é uma solução promissora para contenção de taludes escavados, mas pode-se aplicar esta técnica para estabilização de taludes sem que ocorram cortes e remoção de solo. O quadro 1, descrito por Lozano e Paias (2006), mostra esquematicamente a sequência de construção de estruturas em solo grampeado, quando estas exigem escavações.

	<p><b>ESCAVAÇÃO:</b> os taludes são escavados mecanicamente ou manualmente conforme geometria e seqüência de projeto.</p>
	<p><b>INSTALAÇÕES DOS GRAMPOS:</b> os taludes são perfurados, os grampos são preparados, instalados e alojados nos furos para a injeção. Os espaçamentos verticais e horizontais são definidos a partir de análise de estabilidade.</p>
	<p><b>CONCRETO PROJETADO:</b> a parede do talude recebe o jateamento da mistura (água, cimento, pedrisco, areia e fibra). Executa-se o acabamento. Em função da inclinação do talude pode-se executar ainda um paramento vegetal.</p>
	<p><b>ESCAVAÇÃO DA NOVA FRENTE:</b> cumpridas as etapas anteriores, pode-se dar continuidade as escavação e repetir o processo até a profundidade desejada.</p>

Quadro 1: sequência construtiva didática de um sistema em solo grampeado (adaptado de LOZANO e PAIAS, 2006)

### 3.3 ELEMENTO GRAMPO

A injeção correta de grampos é fundamental para a eficiência da estabilidade do maciço pela técnica em solo grampeado. Segundo Pitta e Zirlis (2000) não se deve considerar como grampo aquele cuja injeção não foi bem realizada. Desde o início da utilização desta técnica no Brasil, evoluiu-se muito em relação aos cuidados que se deve ter com a injeção da nata de cimento. Cita-se, nessa evolução, o cuidado com a relação água-cimento, com a utilização de aditivos expansores, com a injeção de bainha por tubos auxiliares, com a utilização de centralizadores e com a proteção anticorrosiva. O fato desfavorável, neste contexto é que esta etapa raramente é detalhada em projeto.

A importância de uma correta injeção na execução de grampos no seu desempenho apresenta-se descrita na forma de um gráfico de barras apresentado na figura 2. Neste gráfico, mostra-se a melhora, em torno de 50%, na aderência do contato entre o grampo e o solo quando a nata de cimento é injetada no furo. De fato, a injeção provoca o preenchimento das fissuras nas proximidades do grampo com nata de cimento realizando micro-ancoragens. Isto pode ser visto claramente quando se realiza a exumação de algum grampo. A exumação é o processo pelo qual se escava o solo que envolve o grampo de forma a comprovar a sua integridade. Além disto, é importante ter o controle da pressão de injeção durante a execução do grampo (PITTA e ZIRLIS, 2000).

O comportamento geomecânico da estrutura em solo grampeado não está vinculado somente a um elemento grampo, mas sim a um conjunto destes que formam um sistema. Se não fosse a injeção, não se poderia redistribuir e equilibrar os esforços na massa de solo. (PITTA e ZIRLIS, 2000).

Quanto às barras de aço que compõem os grampos, utilizam-se geralmente barras dobradas na ponta em contato com o faceamento de concreto projetado (figura 3). Entretanto, quando os diâmetros das barras são maiores que 22mm, utilizam-se normalmente placas e porcas, pois neste caso é quase impossível dobrar as extremidades das barras.



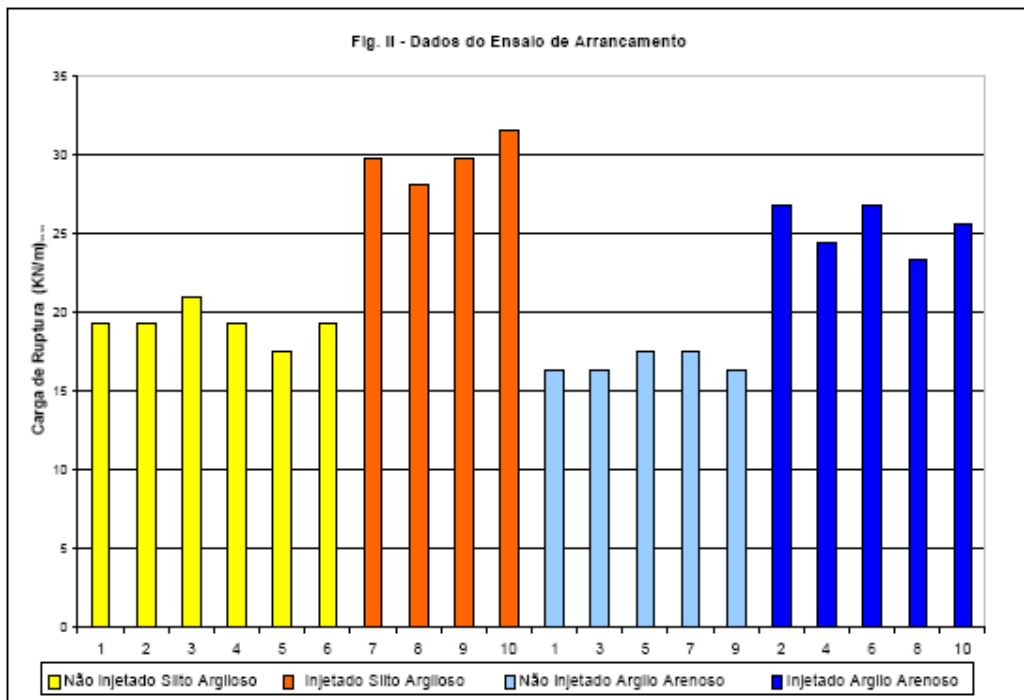


Figura 2: gráfico da carga de ruptura de grampos sem injeção e com injeção de nata de cimento (PITTA e ZIRLIS, 2000)

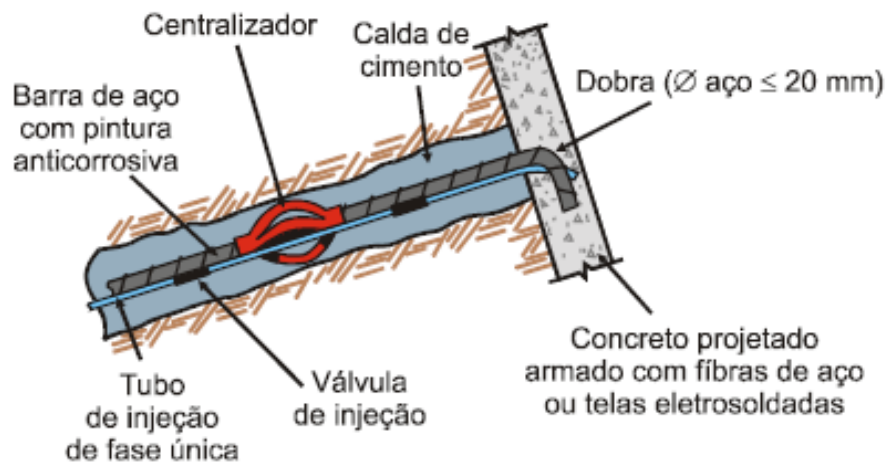


Figura 3: desenho esquemático dos elementos do grampo

### 3.4 COMPORTAMENTO COMO ESTRUTURA DE CONTENÇÃO

Os mecanismos que levam os sistemas de solo grampeado à ruptura foram didaticamente apresentados por Lazarte et al. (2003). A figura 4 mostra estes mecanismos que envolvem estabilidade externa e interna do sistema.

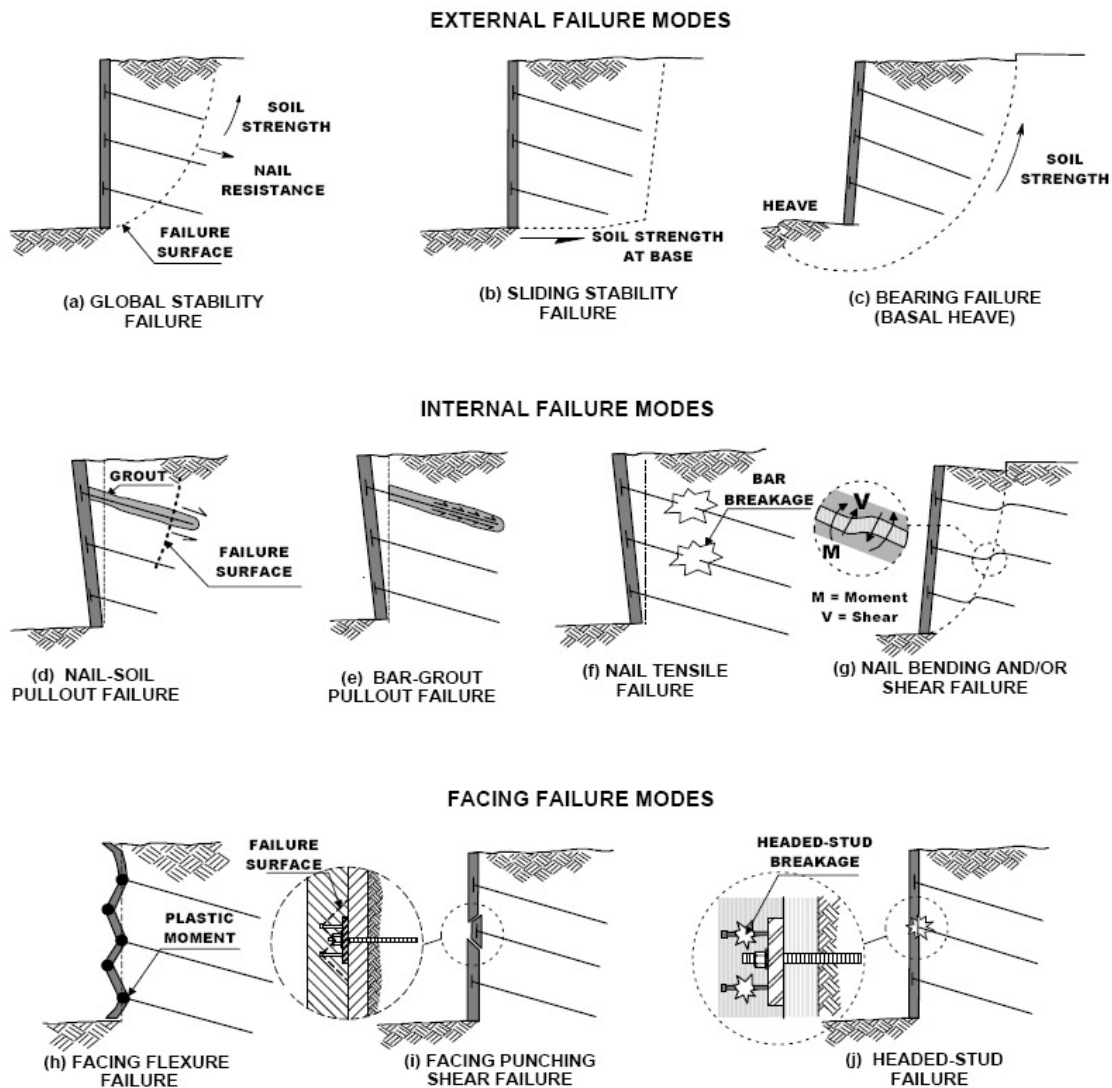


Figura 4: principais modos de ruptura de um sistema de solo grampeado (LAZARTE et al., 2003)

No início desta década, estabeleceu-se uma discussão formal em artigos técnicos tendo em vista a maneira como o solo grampeado se comporta como estrutura de contenção. Lazarte et al., (2003), no manual técnico de solos grampeados da Federal Highway Administration (FHWA) descrevem as possíveis causas que levam os sistemas de solo grampeado à ruptura:

- a) **ruptura por arrancamento do grampo:** a falta de resistência ao arrancamento dos grampos é o tipo de ruptura mais comum. Ao longo da interface solo-nata ocorre insuficiência na resistência ao cisalhamento ou o comprimento do grampo é insuficiente, conforme a figura 4d;
- b) **deslizamento na interface entre a barra de aço e a nata de cimento:** a resistência ao deslizamento ao longo da interface entre a nata de cimento e a barra de aço (Figura 4e) é obtida principalmente a partir da intrusão mecânica da nata de cimento que penetrou entre as saliências e cavidades da barra com a superfície da nata de cimento. Esta intrusão mecânica oferece resistência significativa quando são utilizadas barras corrugadas;
- c) **resistência à tração do grampo insuficiente:** o grampo (constituído pela nata de cimento e pela barra de aço) pode apresentar ruptura caso existir insuficiência na sua resistência às forças de tração, conforme a figura 4f;
- d) **momentos fletores e esforços cortantes nos grampos:** no sistema de solo grampeado, o grampo trabalha predominantemente à tração, mas também pode mobilizar flexão, devida ao esforço cortante e ao momento fletor na intersecção da superfície potencial de deslizamento no solo com a direção do grampo (SCHLOSSER, 1983; ELIAS E JURAN, 1991 apud LAZARTE et al., 2003), figura 4g. As resistências aos esforços cortantes e aos momentos fletores do sistema de solo grampeado são mobilizados apenas após terem ocorrido deslocamentos relativamente grandes, localizados ao longo da superfície potencial de deslizamento. Alguns pesquisadores constataram que o esforço cortante e o momento fletor, nas piores hipóteses, contribuem não mais do que aproximadamente 10% da estabilidade global do sistema. Devido a esta contribuição relativamente modesta, as resistências aos esforços cortantes e aos momentos fletores têm sido conservadoramente ignoradas no projeto de sistemas de solo grampeado. A discussão de uma metodologia para o cálculo de contribuição dos esforços cortantes e dos momentos fletores não será descrita neste trabalho, podendo ser encontrada em Elias e Juran (1991).

A ruptura por arrancamento do grampo é comandada pela resistência ao cisalhamento no contato entre solo e nata de cimento do trecho de ancoragem ( $L_a$ ). Este trecho  $L_a$  representa a parte do grampo fora da zona ativa, portanto, dentro da zona passiva, zonas estas, delimitadas pela superfície potencial de ruptura. Esta resistência pode ser calculada como uma sollicitação axial (equação 1).

$$Q = q \cdot \pi \cdot D_m \cdot L_a \quad (1)$$

Onde:

$q$  = tensão de cisalhamento no contato do solo com a nata de cimento;

$L_a$  = comprimento do trecho ancorado;

$D_m$  = diâmetro médio do furo.

Segundo Saré (2007), esta é a sollicitação mais representativa de uma estrutura em solo grampeado. Em qualquer obra, recomenda-se a realização de ensaios de arrancamento de grampos (ver item 5.5.1) que permitem a obtenção da resistência ao cisalhamento na interface entre solo-grampo ( $q_s$ ) ao longo do comprimento ensaiado. Este parâmetro é de grande importância para comparação com os resultados das análises pelo MEF descritas neste trabalho. Esta resistência ao cisalhamento é mobilizada em pequenas deformações internas no solo devido à descompressão lateral provocada pela sequência de escavações. Os valores típicos de  $q_s$ , para diferentes tipos de solos, são apresentados no quadro 2. Também, neste quadro, encontram-se os valores de  $q_s$  determinados a partir dos ensaios de arrancamento de grampos realizados na obra da Terceira Perimetral estudada neste trabalho.

material	método construtivo	tipo de material	tensão de arrancamento $q_s$ (kPa)
rochas	perfuração rotativa	basalto	500-600
		dolomita fissurada	600-1000
solos pouco coesivos		areia-pedregulho	100-180
		areia siltosa	100-150
		silte	60-75
		piedmont residual	40-120
		colúvio	75-150
solos finos		argila siltosa	35-50
<b>SRGPA</b>		<b>solo residual</b>	<b>204-270</b>

Quadro 2: valores típicos de  $q_s$  citados na literatura geotécnica e os determinados para a obra estudada neste trabalho (adaptado de LAZARTE et al., 2003)

Cabe observar que, não somente o tipo de solo, mas o método construtivo também influencia na tensão de arrancamento. Por exemplo, pode-se chegar a 700 kPa de resistência ao arrancamento de um elemento executado com jet-grout em areias ou pedregulhos, valor bastante maior que os valores de 100 a 180 kPa executado com perfuração rotativa.

### 3.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Normalmente, o dimensionamento de sistemas em solo grampeado busca, na fase de projeto, obter basicamente os comprimentos dos grampos, os espaçamentos horizontais e verticais entre estes e o tipo de grampo. O dimensionamento é realizado através das avaliações de estabilidade interna e externa do sistema. Nos últimos anos, houve aperfeiçoamentos das interfaces gráficas dos programas computacionais de análise de estabilidade de taludes e a simplificação da utilização dos comandos de entrada de dados paramétricos. Por exemplo, o programa computacional SlopeW, da empresa GeoSlope, utilizado para análise de estabilidade no projeto da obra em solo grampeado estudada neste trabalho, avalia a estabilidade externa global do sistema através de métodos de forças ou momentos e permite a inserção de elementos de reforços na forma de forças (cargas de trabalho) que simulam elementos de grampos ou tirantes. Com isto, podem-se determinar os comprimentos e os espaçamentos destes elementos para que o sistema se torne estável levando em consideração um fator de segurança adequado. Portanto, este programa, permite avaliar a estabilidade interna e externa deste sistema de contenção através de equilíbrio de forças e momentos.

#### 3.5.1 Estabilidade Externa

Para a avaliação da estabilidade externa de contenções de sistemas em solo grampeado consideram-se os seguintes critérios:

- a) planos de ruptura que ultrapassem a zona de atuação dos grampos;
- b) cunhas com superfícies de deslizamento na base;
- c) planos de ruptura que interceptam os grampos.

Portanto, pode-se assumir o procedimento de cálculo utilizando os métodos de análise de estabilidade de taludes, como por exemplo: Fellenius, Jambu, Bishop e Morgenstern-Price, etc. Considera-se também, a utilização de um fator de segurança discriminado pela norma NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS) em função do grau de risco da obra, podendo variar de 1,1 a 1,5.

Alguns projetistas entendem que os sistemas em solo grampeado, para serem calculados a estabilidade externa, assemelham-se aos muros de gravidade (projeto original – Azambuja Engenharia e Geotecnia LTDA.). Porém, deve-se tomar o cuidado com a densidade de grampos, pois esta é que caracteriza se o sistema funciona ou não como muro de gravidade “injetado ao terreno”. Quando se têm altas densidades de grampo este sistema aproxima-se mais de um muro de gravidade. Sendo assim, pode-se avaliar basicamente se a estrutura resiste ao tombamento e ao deslizamento na base.

A alínea c acima define a interação entre a análise de estabilidade interna com a análise de estabilidade externa. Pois, uma superfície que intercepta a linha de grampos define o comprimento de ancoragem destes elementos. Este comprimento é função da tensão de cisalhamento que existe no contato entre o grampo e o solo, parâmetro este avaliado na estabilidade interna quando os grampos são submetidos a uma tensão de arrancamento.

### **3.5.2 Estabilidade Interna**

O sistema em solo grampeado pode ser avaliado, quanto a sua estabilidade interna segundo Hachich e Camargo (2003) pelos seguintes métodos de análise de equilíbrio limite, mais utilizados atualmente em projetos.

- a) Fellenius modificado e processos similares (baseados em Bishop simplificado, Spencer, etc.): Fator de segurança (FS) no equilíbrio limite de momentos e no arrancamento de grampos;
- b) Jewell: FS nos parâmetros (coesão e ângulo de atrito);
- c) Davis: FS nos parâmetros (coesão e ângulo de atrito);
- d) Juran et al.: FS no arrancamento dos grampos, também é definido um FS parcial, aplicado ao momento fletor resistente do grampo, adotando valor unitário para este FS;
- e) Estável: por ser uma extensão dos processos de Bishop simplificado e Spencer, utiliza um único FS que se aplica tanto ao equilíbrio de momentos e forças quanto (indiretamente) ao arrancamento;
- f) Multicritério: FS no equilíbrio de momentos e na tensão normal de interface do solo com os grampos (“corte” no aterro pelos grampos), FS unitário no escoamento do aço e no arrancamento.

Estes métodos, assim como os mencionados no item 3.5.1, são calculados dividindo a massa potencial de ruptura em fatias e permitem avaliar, basicamente, a integridade do grampo quanto à resistência ao arrancamento. A tensão de cisalhamento entre o solo e a nata de cimento que envolve o aço não deve ultrapassar a tensão de ruptura deste contato. Esta tensão é avaliada como uma força que contribui para a estabilidade no somatório de forças ou momentos. Com base nesta avaliação, varia-se o comprimento de ancoragem e a densidade dos grampos (espaçamentos, horizontal e vertical) considerando um fator de segurança.

Também na análise de estabilidade interna, verifica-se a capacidade ao esforço de tração do elemento grampo. Normalmente a estrutura de base dos grampos é o aço, para fins de simplificação, geralmente utiliza-se para o dimensionamento a carga de trabalho deste material fornecido pelo fabricante.

### 3.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Saré (2007) afirma que a técnica de solo grampeado vem sendo aperfeiçoada com a experiência brasileira. No início da aplicação desta solução, o comportamento mecânico deste sistema era pouco conhecido. Com o passar do tempo a evolução do processo foi ganhando a confiança dos projetistas sob diversos pontos de vista, de modo que a técnica de solo grampeado passou a apresentar algumas vantagens na sua utilização. Estas vantagens são:

- a) **baixo custo:** na execução da obra não é necessário a mobilização expressiva de equipamentos. Apenas equipamentos para remoção de materiais, de perfuração em solo ou rocha, de injeção de nata de cimento e, por fim, para o lançamento de concreto projetado, que tem espessura relativamente pequena (tipicamente entre 0,05 a 0,15 m);
- b) **facilidade de execução:** os equipamentos citados na alínea acima podem ser facilmente encontrados no mercado nacional e são de utilização relativamente simples;
- c) **velocidade na construção:** as escavações em solos ou rochas mais duras, que requerem maior tempo de execução por metro de perfuração, exigem comprimentos de grampos menores. Também, o lançamento do concreto projetado não necessita de preparo de formas, espera de cura, etc;
- d) **acessibilidade:** os equipamentos citados acima podem ser utilizados em áreas de grande densidade de trânsito e edificações;

- e) **segurança:** a estrutura pode ser executada seguindo a inclinação do terreno, evitando instabilidades. Os deslocamentos para mobilizar a atuação dos grampos são baixos quando, logo após as escavações, os grampos são inseridos no solo. Este tipo de estrutura tem um comportamento satisfatório em regiões sísmicas devido principalmente à sua flexibilidade;
- f) **versatilidade:** a técnica é melhor aplicada em solos homogêneos quando se encontram solos granulares compactos ou argilas arenosas rijas de baixa plasticidade nas escavações. Porém, estudos apresentados por Saré (2007), mostram bons resultados também em solos heterogêneos.

É fato conhecido que o sistema de solo grampeado também apresenta suas desvantagens referentes ao projeto e execução. Algumas limitações desse sistema são:

- a) **necessidade de coesão:** o solo necessita ter coesão suficiente para manter o corte da fase de escavação estável até que os grampos sejam inseridos;
- b) **nível d'água:** o sistema não permite a execução em solo com nível d'água no limite das escavações. Quando isto ocorre deve-se realizar previamente o rebaixamento do lençol freático;
- c) **monitoramento:** deve-se realizar algum tipo de monitoramento dos deslocamentos do faceamento e dos grampos durante e até seis meses após o término da obra, pois o processo de mobilização da carga de trabalho dos grampos pode levar algum tempo. Sendo assim, os recalques podem prejudicar as estruturas de vizinhança;
- d) **corrosão:** deve-se tomar o cuidado necessário na injeção de nata de cimento, principalmente quanto à sua execução e ao cobrimento mínimo necessário para a proteção da barra de aço no interior do grampo contra a corrosão;
- e) **deformações:** dificuldade na previsão dos deslocamentos do faceamento e dos grampos, principalmente no caso de solos heterogêneos ou com o comportamento mecânico anisotrópico.



## 4 SOLO RESIDUAL DE GNAISSE

Neste item descreve-se brevemente a geologia do solo residual de gnaiss e os resultados de ensaios de cisalhamento direto (BERNARDES, 2003) e ensaios triaxiais (GOBBI, 2005) realizados na UFRGS com amostras indeformadas do solo residual do Gnaiss Porto Alegre. Como já referido no capítulo 1, este solo foi encontrado na maior parte das escavações da obra em solo grampeado estudada neste trabalho de diplomação.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE

Os solos residuais de gnaiss (horizonte C) apresentam suas características físicas e suas propriedades mecânicas oriundas da rocha metamórfica denominada gnaiss. Por este motivo, apresenta-se neste item uma rápida descrição dessas características e propriedades com base no conhecimento da formação e do tipo de metamorfismo das rochas gnáissicas.

Segundo Press et al. (2006) o metamorfismo é a alteração no estado sólido de rochas preexistentes. É causado pelo aumento da pressão e da temperatura e por reações com componentes químicos introduzidos pela migração de fluidos através dessas rochas. À medida que as pressões e temperaturas aumentam nas profundezas da crosta terrestre há um rearranjo dos componentes químicos das rochas. As rochas metamorfizadas em pressões e temperaturas relativamente baixas são referidas como rocha de baixo grau. Aquelas rochas metamorfizadas em pressões e temperaturas elevadas são chamadas de rochas de alto grau.

Press et al. (2006) classificam o gnaiss como uma rocha de alto grau de metamorfismo. É caracterizada por uma foliação espessa de rochas de coloração clara com bandas de minerais claros e escuros segregados na rocha. O bandamento dos gnaisses em camadas finas claras e escuras resulta da segregação dos minerais quartzo e feldspatos, de coloração clara, e dos anfibólios e outros minerais máficos (ricos em elementos como magnésio e ferro) de coloração escura (figura 5). Esta rocha apresenta foliação fraca, com pouca tendência de se partir.



Figura 5: bandamento de uma estrutura gnáissica

Press et al. (2006) também afirmam que os três principais tipos de metamorfismo são:

- a) **metamorfismo regional** no qual grandes áreas são metamorfozadas por altas pressões;
- b) **metamorfismo de contato** onde as rochas encaixantes com alta temperatura modificam a estrutura das rochas vizinhas;
- c) **metamorfismo de assoalho oceânico** no qual os fluidos quentes percolam e metamorfizam as várias rochas crustais.

Os gnaisses são rochas metamórficas geradas a partir de metamorfismo regional. Quando originadas de rochas graníticas são denominadas de ortognaisses e quando originados de rochas sedimentares são denominados de paragnaisses (TEIXEIRA et al. 2000 apud GOBBI, 2005). Segundo Bartorelli e Haralyi (2000 apud GOBBI, 2005), os gnaisses, dadas as suas formações, apresentam geralmente uma textura anisotrópica determinada pelo bandamento gnáissico e são encontrados no território brasileiro nas porções onde afloram os terrenos pré-cambrianos (embasamento cristalino), principalmente quando associados a zonas de falhas.

As rochas próximas à superfície, devido à ação do intemperismo, são decompostas e aos poucos se transformam em solos residuais. Conforme Vargas (1982 apud BERNARDES,

2003), em granitos e gnaisses, os horizontes de solo residual jovem (horizonte C) tendem a apresentar-se na condição não plástica. Entretanto, os solos micáceos, mesmo com pouca argila, podem apresentar alguma plasticidade, induzindo a um índice de atividade (índice de plasticidade dividido pela fração de argila) fictício. Isto indica que o estudo da mineralogia é necessário para a caracterização e correlação com o comportamento mecânico destes materiais. Também, Sandroni (1981 apud GOBBI, 2005) afirma que alguns solos residuais de gnaiss apresentam pseudoplasticidade, ou seja, uma plasticidade que não é relacionada à presença de argilo-minerais. Já Campos (1989 apud GOBBI, 2005) conclui que, apesar do forte bandamento visível no solo residual, para fins práticos o mesmo apresenta isotropia de resistência ao cisalhamento. Este autor justifica esta afirmação considerando que a presença de um forte grau de intemperismo acabou com a anisotropia de comportamento mecânico herdada da rocha matriz. Reis et al. (2003 apud GOBBI, 2005) apresentaram resultados de ensaios triaxiais em solos residuais de gnaiss jovens e maduros que demonstraram comportamento mecânico isotrópico para os solos jovens quanto a resistência e à deformabilidade (mesmo com bandamentos marcantes da rocha matriz). Curiosamente o solo residual maduro apresentou-se como anisotrópico em relação à deformabilidade. Isso reforça mais ainda a necessidade de realizar estudos de mineralogia para entender melhor o comportamento mecânico dos solos residuais de gnaiss.

## 4.2 SOLO RESIDUAL DO GNAISSE PORTO ALEGRE

Vários projetos de fundações e escavações foram executados no Solo Residual do Gnaiss Porto Alegre (SRGPA), pois este solo ocupa uma porção considerável da região central da cidade de Porto Alegre (AZAMBUJA et al., 2003). A rocha Gnaiss Porto Alegre foi designada como um ortognaiss (PHILIPP et al., 1994 apud GOBBI, 2005). Esta estrutura é descrita por estes autores como uma associação de gnaisses monolíticos, polideformados, sendo esta a unidade mais antiga do embasamento cristalino. Este gnaiss ocorre como um megaxenólito no Granito Independência e também como xenólitos menores no Granito Viamão. Os autores também citam que a idade do protólito (rocha de origem) deste gnaiss tem cerca de 2 bilhões de anos e que os metamorfismos aconteceram a cerca de 600 milhões de anos.

Bernardes (2003) descreve a utilização de amostras indeformadas na forma de blocos, coletadas nas profundidades de 3 m e 11 m, durante as escavações da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral, também estudada neste trabalho de diplomação. O objetivo do trabalho de Bernardes (2003) foi realizar ensaios de laboratório para determinar a mineralogia, a caracterização física e o comportamento geomecânico deste solo, neste caso através de ensaios de cisalhamento direto. Isto é detalhado nos próximos itens.

#### **4.2.1 Caracterização e Mineralogia**

Bernardes (2003) determinou as curvas granulométricas para o SRGPA nas profundidades de 3 m e de 11 m, notando que ambos os solos apresentaram granulometria semelhante, sendo classificado como areia siltosa. Os minerais encontrados no SRGPA foram: feldspato alcalino, quartzo, plagioclásios e biotitas constituindo a assembléia primária; epídoto, clorita, argilominerais e óxidos de ferro, como minerais secundários. Observando fotomicrografias deste solo, a autora identificou a presença de bandas de biotita intercaladas por níveis quartzo-feldpáticos e observou que a biotita, quando não fraturada, encontrava-se bastante deformada.

Em ambos os blocos amostrados observaram-se pequenas lentes (menores que 2 cm) de material argiloso. Este material foi identificado como um processo de cimentação dos grãos, apresentando óxidos de ferro e manganês como agentes cimentantes (BERNARDES, 2003). A figura 6 apresenta um corte, no SRGPA, para a execução da estrutura em solo grampeado analisada neste trabalho. Durante as escavações observou-se a presença de descontinuidades no SRGPA com preenchimento de material argiloso. Possivelmente, estas descontinuidades podem ter contribuído para formações de planos de fraqueza no interior do solo. Talvez, isto pode caracterizar os baixos valores dos parâmetros geotécnicos encontrados nas retroanálises realizadas por Azambuja et. al (2003), que definem o critério de ruptura do maciço.



Figura 6: estrutura gnáissica do SRGPA (BERNARDES, 2003)

#### 4.2.2 Ensaios de Cisalhamento Direto e *Ring Shear*

O ensaio de cisalhamento direto baseia-se no critério de ruptura de Mohr-Coulomb que expressa graficamente a envoltória de resistência ao cisalhamento de um solo onde a tensão de cisalhamento, no plano de ruptura imposto pelo ensaio, atinge seu valor máximo. Aplica-se uma tensão normal ao plano em que o corpo de prova de solo será cisalhado e mede-se a tensão de cisalhamento ao decorrer do deslocamento relativo das duas metades da caixa de cisalhamento contendo o corpo de prova. Os objetivos do ensaio de cisalhamento direto são (i) determinar a resistência ao cisalhamento de pico do solo, ou seja, a tensão de cisalhamento máxima; (ii) determinar a resistência ao cisalhamento de estado crítico, isto é, a tensão de cisalhamento que o corpo de prova ainda sustenta após ultrapassar a ruptura de pico; e (iii) registrar os deslocamentos verticais do corpo de prova. Quando se realiza o ensaio com várias tensões normais, que simulam o estado de tensões de campo, obtém-se a envoltória de resistência ao cisalhamento (PINTO, 2002).

Este ensaio não permite obter parâmetros de deformabilidade do solo. Porém, permite-se conhecer de uma forma relativamente simples e precisa os seguintes parâmetros geotécnicos

do solo: ângulo de atrito interno e intercepto coesivo, os quais são muito importantes para projetos geotécnicos.

Para melhor caracterizar o comportamento das amostras cisalhadas, Bernardes (2003) realizou ensaios de cisalhamento direto moldando corpos de prova de forma que a orientação dos planos de bandamento (descritos pela autora como planos de xistosidade) ficasse perpendicular ao plano de cisalhamento. A autora realizou, também, ensaios em que o corpo de prova foi moldado de modo que seus planos de bandamento ficassem paralelos ao plano de cisalhamento. Foram, ainda, realizados ensaios de cisalhamento direto com amostras reconstituídas.

No quadro 3, apresenta-se os resultados dos ensaios de cisalhamento direto com as amostras retiradas das profundidades de 3 e 11 m. Para os valores de ângulo de atrito interno obtidos, não há uma variação considerável entre as diferentes amostras de SRGPA. Quanto ao intercepto de coesão, o solo mais profundo apresenta valores consideravelmente maiores.

Tipos de solo		Solo residual de gnaiss superior (3 m)		Solo residual de gnaiss inferior (11 m)	
Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento		c (kPa)	$\phi$ (°)	c (kPa)	$\phi$ (°)
Orientação dos planos de xistosidade	Perpendicular	16,4	30,4	21,9	31,7
	Paralela	15,1	24,8	18,8	25,3
Amostras reconstituídas		10,1	26,9	15,4	28,2

Quadro 3: parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss obtidos a partir de envoltórias com ajuste linear (BERNARDES, 2003, p. 93)

Segundo Bernardes (2003), a influência menos significativa do grau de intemperismo nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA pode ser atribuída ao fato de que a resistência ao cisalhamento deste material é comandada principalmente pelo bandamento micáceo. Os valores inferiores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados nos ensaios com orientação paralela (em relação aos ensaios com orientação perpendicular) são justificados pela foliação dos níveis micáceos e pelo comportamento dúctil das lamelas de biotita, que se deformam conforme a sollicitação, alinhando-se no plano de cisalhamento. Portanto, a resistência ao cisalhamento em parte é influenciada pela orientação das partículas,

principalmente as micáceas. Além disto, quando a amostra é solicitada perpendicularmente aos planos de bandamento, devem-se quebrar as partículas de minerais.

Como mostra o quadro 3, quando a amostra sofre cisalhamento na direção paralela aos planos de bandamento, a resistência do SRGPA torna-se menor que quando o cisalhamento ocorre perpendicularmente aos planos de bandamento. Quanto ao solo reconstituído, as partículas se encontram com orientação aleatória no corpo de prova e os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento usualmente se tornam mais baixos. A figura 7 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento para o solo superior, segundo suas tensões normais ensaiadas.

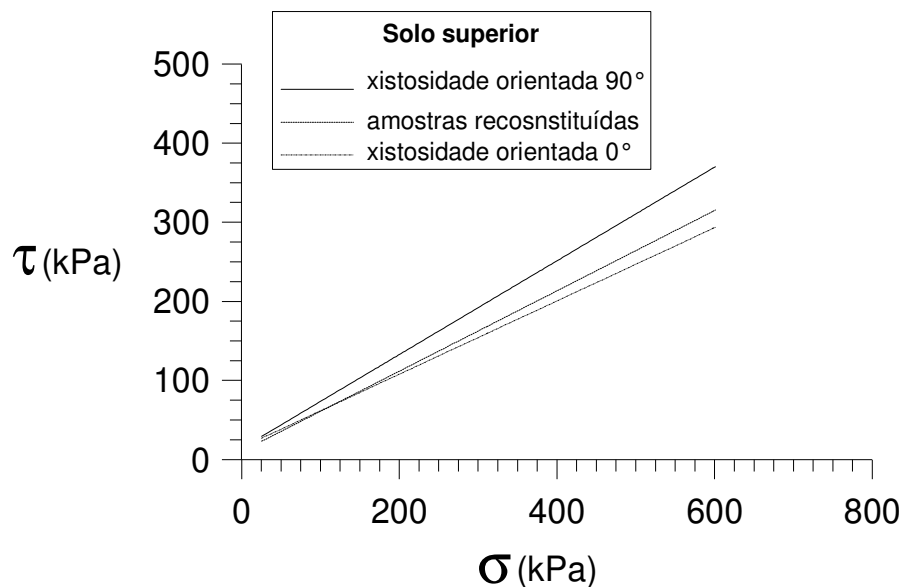


Figura 7: envoltórias de resistência ao cisalhamento do SRGPA superior, obtidas de amostra com a xistosidade paralela e perpendicular à superfície de ruptura e de amostras reconstituídas. (BERNARDES, 2003)

Bernardes (2003) explica que, quando se observam níveis de tensão normal mais baixos, houve um aumento relativo na resistência ao cisalhamento. Isto se deve, quando o solo é cisalhado perpendicularmente aos planos de bandamento, à expansão volumétrica observada. Observou-se este comportamento mais acentuadamente no solo de maior profundidade.

Os ensaios de cisalhamento direto realizados com as tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, para as amostras mais profundas, com plano de cisalhamento perpendicular aos planos de bandamento, apresentaram um pico de resistência ao cisalhamento. A ruptura ocorreu quando

o deslocamento observado foi de aproximadamente 4 mm, com exceção de dois ensaios realizados com tensão normal de 25 kPa (BERNARDES, 2003).

Observando as curvas de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal obtidas dos ensaios de cisalhamento do SRGPA pode-se dizer que a presença de um pico de resistência ao cisalhamento não se relaciona ao comportamento expansivo do material. Provavelmente este comportamento está relacionado com a cimentação devida a reações químicas em função do intemperismo ou a ligações estruturais com origem na rocha matriz (CAMPOS, 1989 apud BERNARDES, 2003).

A dispersão dos resultados referentes aos ensaios de cisalhamento direto, realizados com o plano de cisalhamento paralelo aos planos de bandamento, é devida principalmente à variação da posição da amostra que não se encontra orientada a 0° com o bandamento. Assim, com uma pequena inclinação da amostra em relação ao bandamento, a resistência aumenta, pois, é necessário que ocorra o deslocamento ou quebra das partículas de agregados quartzo-feldspáticos (BERNARDES, 2003). Isto demonstra a importância de orientar cuidadosamente os planos de xistosidade com a direção de cisalhamento.

Segundo Bernardes (2003), através de observação no microscópio ótico das lâminas das seções de corpos de prova ensaiados a 200 e 300 kPa, no solo residual de gnaiss inferior, puderam ser feitas as seguintes constatações:

- (a) a estrutura da amostra não se altera fora da zona de abrangência da superfície de ruptura;
- (b) agregados quartzo-feldspáticos pequenos tendem a se deslocar na ruptura, enquanto agregados maiores tendem a se fragmentar;
- (c) os grãos de biotita se deformam e se reorientam ao longo da superfície de ruptura;
- (d) no processo de ruptura os grãos de biotita também se deslocam e tendem a se acomodar entre os grãos de quartzo e feldspato.

Também foram realizados ensaios *Ring Shear* para obtenção do ângulo de atrito interno residual do solo residual de gnaiss segundo Bernardes (2003). Para isso foram feitos dois ensaios:

- a) com material peneirado na peneira de malha 1 mm, obtendo-se um ângulo de atrito interno residual de 17,3°;



- b) com material peneirado na peneira de malha 0,42 mm, obtendo-se um ângulo de atrito interno residual de 13,8°.

Vários autores atribuem baixos valores de ângulo de atrito interno residual em solos predominantemente granulares à presença de minerais micáceos (BERNARDES, 2003).

### 4.2.3 Ensaios triaxiais

O ensaio de compressão triaxial consiste na aplicação de uma tensão de confinamento ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) e de um carregamento axial ( $\sigma_1$ ) sobre um corpo de prova cilíndrico de solo. Para isto, o corpo de prova é colocado em uma câmara de ensaio e envolto por uma membrana de borracha. A câmara é preenchida com água à qual se aplica uma pressão, denominada de pressão confinante. Já o carregamento axial é feito por meio de aplicação de incrementos discretos de força no pistão que penetra na câmara, conhecido como ensaio de carga controlada; ou coloca-se a câmara no prato de uma prensa eletromecânica, que a desloca verticalmente, este ensaio é conhecido como de deformação controlada. A tensão devida ao carregamento axial é denominada de acréscimo de tensão axial ou tensão desvio ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2$ ). Durante o carregamento, medem-se a tensão desvio e a deformação vertical do corpo de prova (PINTO, 2002).

Existem basicamente três tipos de ensaios triaxiais convencionais no que se refere às condições de drenagem do corpo de prova. São eles: Ensaios Consolidado e Drenado (CD), onde existe permanente drenagem do corpo de prova e o adensamento acontece até que a poro pressão seja dissipada, seguida pela ruptura em condições drenadas; Ensaios Adensados e Não Drenados (CU), onde não existe circulação livre de água dentro do corpo de prova, que é adensado sobre a pressão confinante, seguido de ruptura em condições não drenadas com medida de poro pressão; Ensaio Não Adensado Não Drenado (UU), onde o corpo de prova é submetido à pressão confinante em condições não drenadas, e a seguir, ao carregamento axial sem que, também, se permita qualquer drenagem (PINTO, 2002).

Gobbi (2005) realizou ensaios triaxiais CD, que tem seus resultados aplicados a este trabalho de diplomação, para o SRGPA. Além das medições padronizadas, o autor contava com medição local de deformações através de sensores de efeito Hall (medição de deformações axiais e radiais) e célula de carga interna à câmara triaxial. O autor realizou os ensaios

triaxiais com o intuito de estudar o comportamento mecânico e a anisotropia de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade do SRGPA. Para isso, moldaram-se corpos de prova adotando três ângulos ( $\alpha$ ) relativos à direção do bandamento do solo e à direção de aplicação da tensão desvio. Os ângulos foram os seguintes:  $\alpha = 0^\circ$  (denominado de IV),  $\alpha = 90^\circ$  (IH) e  $\alpha = 55^\circ$  (IC). A orientação de  $55^\circ$  corresponde à orientação do bandamento micáceo do bloco amostrado em campo. Executaram-se, também, ensaios triaxiais com amostras reconstituídas com índice de vazios inicial similar ao das amostras indeformadas.

Estes ensaios triaxiais foram realizados empregando-se quatro tensões confinantes efetivas: 30 kPa, 60 kPa, 120kPa e 200kPa. Estas tensões foram escolhidas por Gobbi (2005) por englobarem a gama de tensões verticais geostáticas efetivas no perfil de escavação da obra em solo grampeado referente a este trabalho de diplomação.

Cabe salientar que os blocos de SRGPA amostrados por Bernardes (2003) foram os mesmos utilizados para os corpos de prova dos ensaios triaxiais realizados por Gobbi (2005).

Nos subitens 4.2.3.1 e 4.2.3.2 apresentam-se os resultados dos ensaios triaxiais IC e IV respectivamente. Estes ensaios foram escolhidos, pois representam limites superiores e inferiores do comportamento geomecânico do SRGPA.

#### 4.2.3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS IC

Para este trabalho de diplomação determinou-se que os resultados mais importantes destes ensaios são as curvas de variação da deformação axial pela tensão desvio (figura 8) e as curvas de variação da deformação axial pelo módulo de deformabilidade secante (figura 9). Segundo Gobbi (2005), em todos os ensaios triaxiais IC apresentaram-se rupturas dúcteis, sem pico de resistência ao cisalhamento.

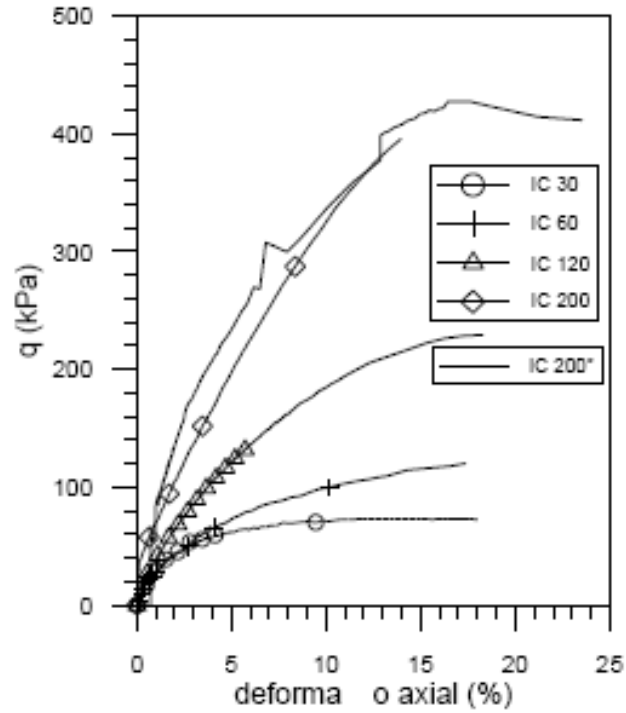


Figura 8: curvas de deformação axial versus tensão desvio para os ensaios IC nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200kPa (GOBBI, 2005)

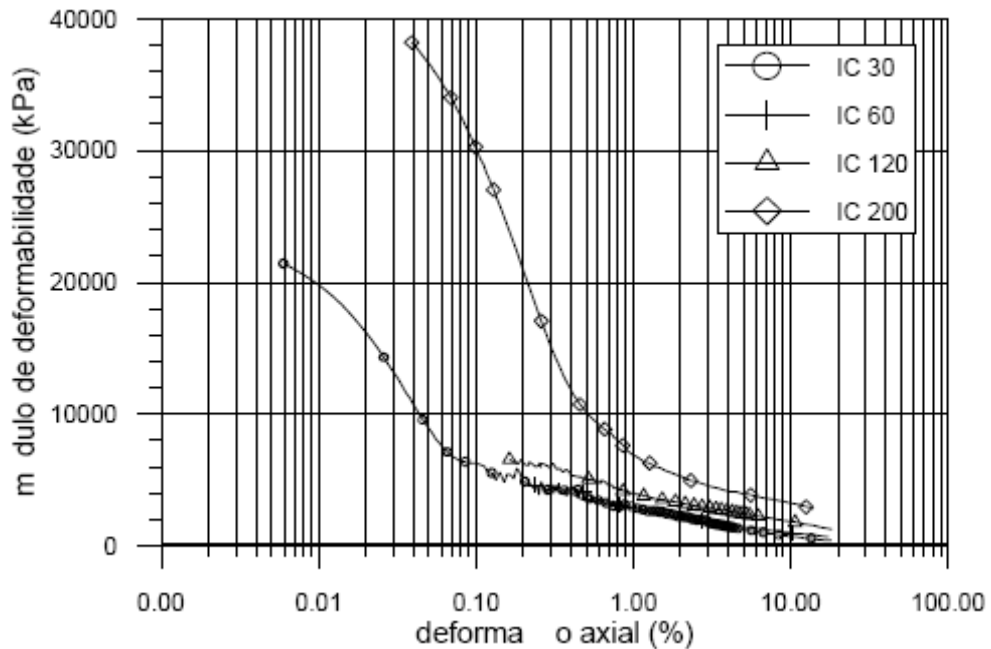


Figura 9: curvas de deformações axiais versus módulos de deformabilidade secante para os ensaios IC nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200 kPa (GOBBI, 2005).

#### 4.2.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS IV

Da mesma maneira que nos ensaios IC, para os ensaios IV foram consideradas as curvas de variação da deformação axial pela tensão desvio (figura 10) e as curvas de variação da deformação axial pelo módulo de deformabilidade secante (figura 11). Segundo Gobbi (2005), estes ensaios apresentaram ruptura frágil, com ocorrência de pico de resistência ao cisalhamento e brusca queda da tensão cisalhante após o pico.

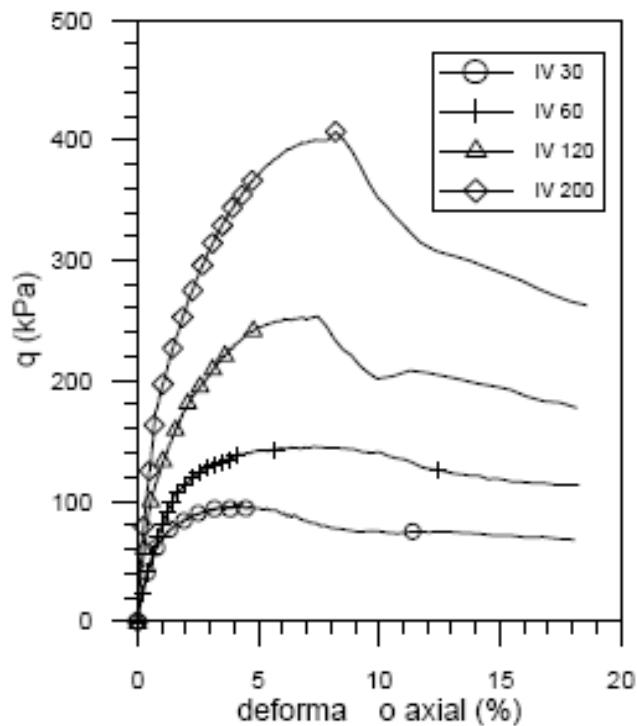


Figura 10: curvas de deformação axial versus tensão desvio para os ensaios IV nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200kPa (GOBBI, 2005)

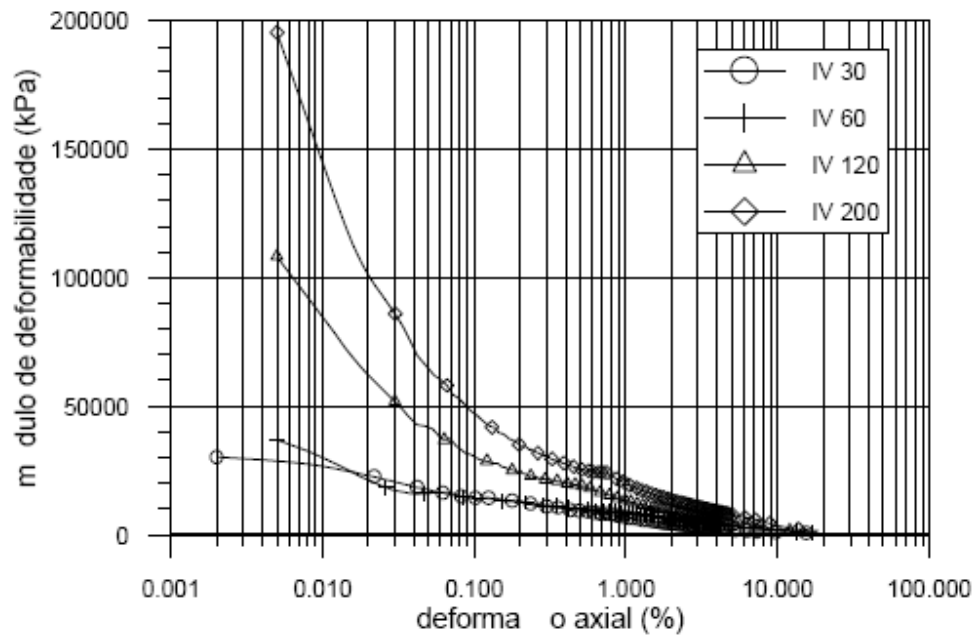


Figura 11: curvas de deformações axial versus módulos de deformabilidade secante para os ensaios IV nas tensões confinantes efetivas de 30, 60, 120 e 200 kPa (GOBBI, 2005).

## 5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO ESTUDADO

Neste item descrevem-se as considerações referentes ao projeto e à execução da estrutura em solo grampeado. Esta obra consiste de um volume total de escavação de aproximadamente 120.000 m<sup>3</sup> em solo residual, atingindo profundidades de até 11 m, necessitando assim, de uma estrutura especial de contenção. Foi escolhida a técnica de solo grampeado por ser a mais econômica e compatível com as condições de subsolo (AZAMBUJA et al., 2003).

### 5.1 GEOLOGIA LOCAL

A obra estudada localiza-se no cruzamento das avenidas Tarso Dutra e Protásio Alves, no Morro Petrópolis, próximo ao seu topo, com cota máxima de aproximadamente 60 m acima do nível do mar. No trecho da obra há duas ocorrências geológicas: um dique de riolito na face leste da escavação e solo residual de ortognaisse na zona central e na face oeste da escavação. O dique de riolito encontra-se entre o maciço granítico e gnáissico com ocorrências de veios de pegmatito (AZAMBUJA et al., 2003).

### 5.2 CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO

O projeto original, conforme Azambuja et al. (2003), previa a execução de paredes diafragma, porém, pela presença de rocha, esta técnica foi inviabilizada. Como alternativa optou-se, então, pela técnica de solo grampeado. Esta opção foi escolhida frente às seguintes vantagens inerentes a esta técnica:

- a) execução descensional;
- b) possibilidade de ajuste do projeto com o avanço das escavações;
- c) custo final inferior à técnica de cortina atirantada.

Azambuja et al. (2003, p.22) salientam que “embora no Brasil não exista uma norma técnica que regulamente os projetos de solo grampeado, essas contenções são utilizadas aqui desde o início da década de 70”.

### 5.3 SISTEMA CONSTRUTIVO

O sistema construtivo de estruturas em solo grampeado pode ser dividido basicamente em três processos de execução: dos chumbadores, do faceamento e da drenagem. Quanto ao sistema construtivo dos chumbadores, utilizado na técnica de solo grampeado aplicada na obra da Terceira Perimetral, Azambuja et al. (2003, p.23) descrevem este sistema da seguinte maneira:

Os chumbadores utilizados foram feixes de 3 barras de vergalhões com Ø20mm, de aço CA-50, cuja carga de trabalho é de 240 kN.

A ancoragem com o faceamento é realizada por ganchos e, por esta razão, dispositivos especiais de suspensão e fretagem foram previstos.

A proteção contra a corrosão desses grampos foi feita por galvanização a fogo e o recobrimento mínimo da pasta de cimento foi de 3 cm.

A perfuração para instalação dos chumbadores foi realizada com processo roto-percussivo e com diâmetro mínimo de 100mm [...].

Quanto ao sistema construtivo do faceamento, segundo Azambuja et al. (2003, p. 23), “o faceamento foi construído em concreto projetado com 12 cm de espessura, reforçado com duas camadas de tela eletrossoldada com 1,38cm<sup>2</sup>/m.”.

Azambuja et al. (2003, p. 23), definem o sistema construtivo da drenagem de contato apresentando a seguinte descrição:

A drenagem de contato foi realizada através de faixas de geocompostos com 0,45 m de largura, dispostos ininterruptamente da crista da cortina até seu pé, espaçados horizontalmente de 2,5 m. O geocomposto utilizado consiste de um núcleo drenante de polietileno entre duas mantas de geotêxtil não tecido de polipropileno.

Azambuja et al. (2003, p. 23), também fazem uma citação quanto às etapas construtivas:

Após a escavação mecânica, foi realizada uma escavação manual criteriosa junto ao faceamento. Sobre esta superfície, são fixados os geodrenos através de grapas metálicas.

Uma primeira camada de proteção de concreto projetado é então aplicada, com uma espessura de 3 cm. Essa proteção permite a execução das perfurações e injeções (atividades mais morosas) sem que ocorra a degradação dos solos, além de garantir a proteção das armaduras do faceamento contra a contaminação por interposição de solo.

Realizadas as perfurações, os grampos são instalados e é procedida a injeção de primeiro estágio, liberando a face para inserção de armaduras e gabaritos para o acabamento do faceamento.

Ao fim dos trabalhos de armação, um segundo estágio de injeção é então realizado nos grampos.

Por fim, o concreto projetado pode ser finalizado em duas camadas, a primeira de 5 cm e a segunda de 3cm. Essa última camada recebe ainda um tratamento manual de polimento com desempenadeiras (réguas) de forma a proporcionar uma textura mais uniforme ao concreto projetado.

## 5.4 DIMENSIONAMENTO

Devido à não existência de uma norma técnica para solos grampeados, no projeto da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral, foram utilizadas como orientação as publicações **Program CLOUTERRE** (1993) e **Reinforced Soil Structures – Design and Construction Guidelines** (CHRISTOPHER et al., 1990 apud AZAMBUJA et al., 2003).

Seguindo-se o processo de dimensionamento que consiste na obtenção dos parâmetros e da verificação da estabilidade interna da região reforçada, realizou-se um programa de 13 sondagens mistas (SPT e rotativa). Como complementos foram realizados, também 12 ensaios CPT (AZAMBUJA et al., 2003).

Com os resultados das sondagens realizaram-se correlações empíricas considerando um material puramente friccional com ângulo de atrito interno equivalente ( $\phi_{eq}$ ) e posteriormente determinaram-se parâmetros de resistência ao cisalhamento coesivo-friccional com ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) e coesão efetiva ( $c'$ ). O quadro 4 mostra os resultados dessas correlações e o peso específico aparente natural do material ( $\gamma$ ) (AZAMBUJA et al., 2003). As zonas referem-se a diferentes regiões dentro do local onde foi realizada a obra.



Parâmetros	Zona					
	1	2	3	4	5	6
$\phi_{eq}$	44°	50°	40°	40°	39°	42°
$\phi'$	35°	40°	32°	32°	34°	32°
$c'$ (kPa)	22	22	22	22	22	22
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	18	18	18	18	18

Quadro 4: parâmetros geotécnicos para a zona de subsolo (AZAMBUJA et al., 2003, p. 26)

O dimensionamento foi realizado a partir de métodos cinemáticos e de análises de estabilidade externa pelo método de Spencer, resultando em chumbadores de comprimentos variando de 3 a 8 m, com espaçamentos horizontais e verticais variando entre 1,5 e 2 m. (AZAMBUJA et al., 2003).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento encontrados são relativamente altos, sendo assim, Azambuja et al. (2003, p. 26) reavaliaram o projeto:

Já que o sistema de solo grampeado permite a revisão do projeto enquanto se avançava com as escavações, foram programadas investigações complementares e ensaios geotécnicos de forma a avaliar melhor os parâmetros de projeto. Essas investigações foram conduzidas nas primeiras escavações realizadas no local e permitiram, em tempo hábil, reavaliar todo o arranjo do sistema de contenção.

Inicialmente previu-se a realização de ensaios triaxiais com medição local de deformações, aumento da tensão desvio e redução da tensão confinante. Entretanto, durante as primeiras escavações encontraram-se descontinuidades de argilas. Estas descontinuidades acabaram comandando o comportamento mecânico dos maciços (AZAMBUJA et al., 2003).

Desta forma, optou-se por realizar rupturas forçadas, sem que estas prejudicassem a obra, de forma a obter, através de retroanálise, os parâmetros geotécnicos do solo em questão. As retroanálises neste contexto apresentam-se mais consistentes que as correlações dos ensaios de campo com amostragens pontuais, pois abrangem uma massa de solo mais representativa e sem perturbações de amostragem. O quadro 5 apresenta os resultados dos parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios complementares (AZAMBUJA et al., 2003).

Descrição	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)
Veio de Pigmático (Retro- análise)	24	14
Gnaiss com juntas (Retro- análise)	20	8
Gnaiss com juntas (Retro- análise)	20	7,5
Gnaiss com juntas (Retro- análise)	20	4,5
Compressão triaxial em Gnaiss	24	22

Quadro 5: parâmetros geotécnicos obtidos nas investigações complementares (AZAMBUJA et al., 2003, p. 27)

A partir das mesmas hipóteses tomadas no dimensionamento, a estrutura em solo grampeado foi redimensionada com os novos parâmetros geotécnicos, obtendo o seguinte arranjo dos grampos: espaçamentos horizontais e verticais variando de 1,75 a 1,25 m e comprimentos variando entre 4 e 11,7 m (AZAMBUJA et al., 2003).

Durante os processos de escavações, ao se deparar com o perfil geológico e o seu comportamento mecânico, foi possível reavaliar as análises paramétricas obtidas, e assim, efetuar um novo arranjo dos grampos. Talvez, isto seja o grande mérito do sistema em solo grampeado (AZAMBUJA et al., 2003).

## 5.5 CONTROLE TECNOLÓGICO

Para que um projeto em solo grampeado seja racional, o controle do sistema é de extrema necessidade, principalmente o controle dos deslocamentos. Nesta obra, foram realizados, além do controle de qualidade convencional: ensaios de arrancamento, monitoramento de deslocamentos da crista do faceamento e instrumentação de grampos (AZAMBUJA et al., 2003). Estes procedimentos são descritos nos próximos itens.

### 5.5.1 Ensaio de Arrancamento de Grampos

Os ensaios de arrancamento de grampos são realizados para obter a resistência ao cisalhamento do contato entre a nata de cimento e o solo. Seu resultado apresenta uma relação entre a tensão de cisalhamento média que é necessária para arrancar o grampo do solo

e o correspondente deslocamento. Estas duas grandezas, tensão de cisalhamento média e deslocamento, são monitoradas e controladas.

Para este ensaio são instalados grampos protótipos. Estes grampos não têm funcionalidade estrutural e consistem de uma única barra de aço. O grampo ensaiado se diferencia do grampo estrutural pela exigência de um trecho livre entre o trecho ancorado e o faceamento, desta forma não carregam o faceamento, e também porque é de menor dimensão. Porém, é utilizada neste tipo de grampo a mesma técnica construtiva dos grampos de função estrutural (AZAMBUJA et al., 2003).

A constituição do arranjo do sistema de grampos protótipos é descrita por Azambuja et al. (2003, p. 28) da seguinte forma:

[...] constituiu-se de um conjunto bomba macaco hidráulicos com capacidade nominal de 600 kN, instalados na cabeça do grampo com a utilização de uma cargueira metálica. A carga aplicada no sistema é convertida em pressão e verificada através de um manômetro na saída bomba. Os deslocamentos na cabeça do grampo foram medidos utilizando defletômetro mecânico com resolução de 0,01mm fixado a um sistema independente de referência.

A execução se dá por ciclos de carga axial, iniciando-se com uma carga de 25 % da carga de trabalho. A cada ciclo aumenta-se o valor da carga axial e medem-se os deslocamentos. O ensaio termina quando não é mais possível aumentar o valor da carga no macaco hidráulico. Neste instante, a resistência última do contato solo-nata é calculada. A figura 12 mostra o gráfico gerado pelo ensaio e o quadro 6 apresenta um resumo destes ensaios (AZAMBUJA et al., 2003).

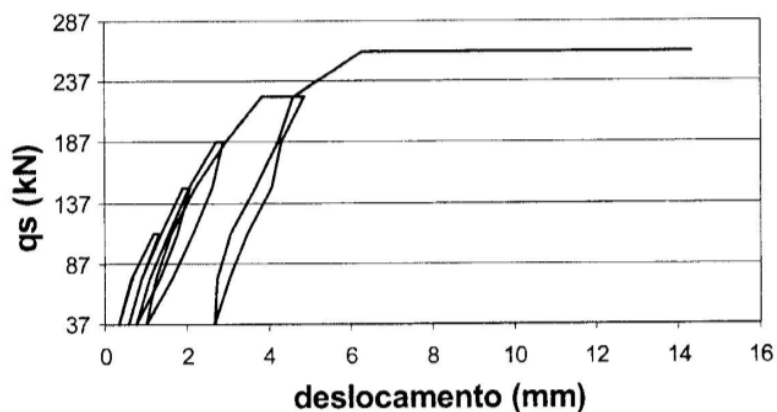


Figura 12: gráfico dos ciclos de carga em um ensaio de arrancamento de grampos (AZAMBUJA et al., 2003, p. 29)

Ensaio	Prof. (m)	ar (kPa)	qs (kPa)	desl.(mm)
1	2,5	200	260	6,5
2	6,76	75	264	7,8
3	4,6	150	261	15,76
4	4,3	125	270	9,3
5	1,5	120	210	5,4
6	4	150	204	10,73

Quadro 6: resultados dos ensaios de arrancamento de grampos (AZAMBUJA et al., 2003, p. 29)

### 5.5.2 Deslocamentos da crista

O deslocamento mais significativo de uma estrutura em solo grampeado está em sua crista. Sendo assim, foram instalados cachimbos no topo dos taludes de corte e estes serviram de suporte para um prisma. Periodicamente foram realizadas as leituras de posicionamento destes cachimbos. Desta forma, foi possível acompanhar o deslocamento da estrutura durante o processo construtivo medindo deslocamentos tanto na direção horizontal quanto na vertical (AZAMBUJA, et al., 2003).

Azambuja et al. (2003, p. 30) interpretam os resultados do monitoramento dos taludes de corte da seguinte forma:

É possível visualizar que os deslocamentos máximos da estrutura nos pontos medidos foram 70 mm na direção horizontal e 23 mm na direção vertical. Os deslocamentos obtidos na obra superaram os deslocamentos esperados para a estrutura. Além dos deslocamentos de crista elevados, as bacias de deformações foram mais amplas que o esperado. A maioria dos registros reporta-se a deformações verticais nulas a distâncias da crista superiores a 1,5 vezes a altura escavada. Nas contenções da III Perimetral, foram observadas trincas de tração e recalques a distâncias de até 2 vezes as alturas escavadas.

### 5.5.3 Resumo dos Parâmetros Geotécnicos

No quadro 7 apresenta-se um resumo dos parâmetros geotécnicos do SRGPA, sejam os mesmos obtidos através de retroanálises (AZAMBUJA et al., 2003), ensaios triaxiais (GOBBI, 2005) ou ensaios de cilhamento direto e *ring shear* (BERNARDES, 2003).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados pela empresa, através de retro-análises de rupturas induzidas, se referem a quatro pontos distintos da obra onde ocorreram rupturas durante a escavação. Cabe salientar que os parâmetros mais baixos se referem aos pontos onde as rupturas estavam relacionadas à presença de descontinuidades preexistentes no interior do SRPAG. Considerando a possível ocorrência dessas descontinuidades remanescentes da rocha de origem, os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados pela empresa foram de 8 kPa de coesão e 20° de ângulo de atrito interno nos trechos da obra onde existia o SRGPA (AZAMBUJA et al., 2003)

“A adoção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em uma escavação em solo residual de gnaiss deve ser feita considerando a possível existência de descontinuidade remanescente da rocha de origem e a direção dos planos de xistosidade do solo.” (BERNARDES, 2003, p. 122).

Orientação do bandamento	( $\alpha$ )	Amostra	Ensaio	c' (kPa)	$\phi'$	Referência
de campo	55	indeformada	Triaxial IC	7,73	26,72	Gobbi (2005)
horizontal	90	indeformada	Triaxial IH	2,79	32,78	Gobbi (2005)
vertical	0	indeformada	Triaxial IV	11,55	28,55	Gobbi (2005)
vertical	0	indeformada	Triaxial IV a Grandes deformações	14,03	21,06	Gobbi (2005)
-	-	reconstituída	Triaxial R	3,62	29,41	Gobbi (2005)
Perpendicular ao plano de cisalhamento		indeformada	Cisalhamento direto	16,4	30,4	Bernardes (2003)
Paralelo ao plano de cisalhamento		indeformada	Cisalhamento direto	15,1	24,8	Bernardes (2003)
Retroanálises				4,5 - 14	20 - 24	Azambuja (2003)
Cone - correlações (projeto preliminar)				22	32	Azambuja (2003)
Parâmetros adotados no dimensionamento final (SRGPA)				8	20	Azambuja (2003)

Quadro 7: resumo dos parâmetros geotécnicos do SRGPA (adaptado de GOBBI, 2005)

## 6 ESCOLHA DA SEÇÃO TRANSVERSAL ANALISADA

Foi escolhida somente uma seção transversal do projeto original da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral para ser analisada numericamente através do programa computacional PLAXIS. Teve-se um cuidado especial nesta escolha, pois não somente se deve ter a maior quantidade possível de informações, mas que estas, também, sejam representativas.

Em meio a um vasto banco de dados, alguns requisitos foram tomados como de extrema importância para a posição da seção transversal:

- a) **buscou-se um trecho da escavação onde se encontrou somente o SRGPA (Solo Residual do Gnaiss Porto Alegre):** isto se deve ao fato de que o estudo deste solo foi bastante detalhado. Porém, em algumas situações, este solo encontra-se atravessado por outras formações geológicas, como diques de riolito, por exemplo (figura 14). Portanto, não se deve extrapolar o comportamento mecânico analisado neste trabalho para toda a obra;
- b) **nas proximidades da seção transversal foi realizado, durante as escavações, pelo menos um ensaio de arrancamento de grampos:** parte-se do princípio de que a resistência última do contato do solo com a nata de cimento é referenciada por este ensaio;
- c) **nesta seção transversal encontra-se pelo menos um ponto de monitoramento topográfico (cachimbo),** no qual se realizaram as medições de deslocamento durante as escavações. Assim, todo o controle de deslocamento vertical e horizontal da crista de escavação da estrutura pode ser comparado com os resultados da análise numérica da estrutura em solo grampeado;
- d) **esta seção transversal situa-se nas proximidades de onde foram retirados os blocos de amostragem** para ensaios de laboratório. Isto garante, assim, a compatibilização dos resultados da análise numérica e da instrumentação da obra com o comportamento mecânico do SRGPA, sendo este avaliado em laboratório.

Assim, a seção transversal escolhida consiste de uma escavação de 10,55 m de profundidade no SRGPA, com oito linhas de grampos e encontra-se nas proximidades da estaca 110+00 (ou estaca 18) na parede 2 do ramo 5 do projeto original. Próximo a esta seção transversal encontra-se o ensaio de arrancamento de grampos 6, realizado à profundidade de 4 m do topo da escavação, onde Azambuja et al. (2003) determinaram a tensão de cisalhamento de arrancamento máxima  $q_s=204$  kPa para um deslocamento de 10,73 mm (quadro 6). Também,

neste local encontra-se o ponto E do monitoramento topográfico, atingindo deslocamentos horizontais de aproximadamente 5 cm. Muito próximo do ponto E encontra-se o ponto F (estaca 19) onde foram medidos um dos maiores deslocamentos horizontais monitorados na obra, chegando praticamente a 7 cm (figura 13). Não se obtiveram dados completos da profundidade de escavação em cada ponto no projeto, apenas sabe-se que no dia 06/mar a escavação encontrava-se a uma profundidade de 3,5 m e em 29/mar a 5 m, tanto para o ponto E quanto para o ponto F e G. A figura 14 mostra as seções típicas de corte encontradas na obra. Além disto, foi nesta posição que Bernardes (2003) e posteriormente Gobbi (2005) realizaram seus estudos sobre o comportamento mecânico do SRGPA através dos blocos de amostragem.

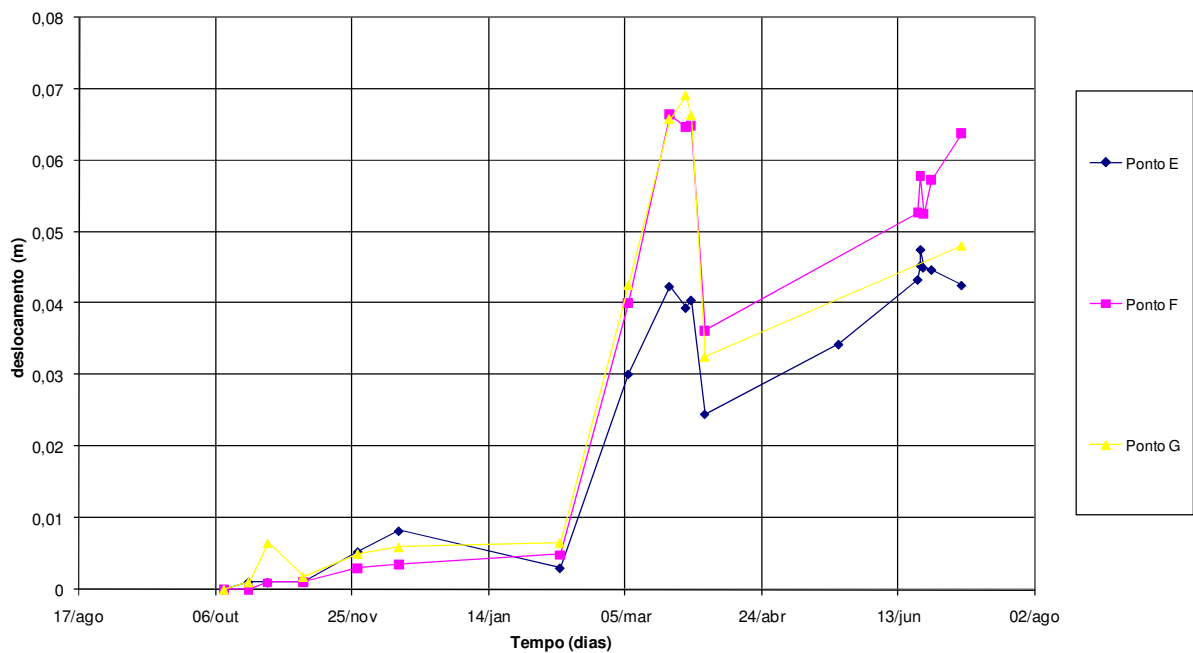


Figura 13: deslocamentos horizontais da parede 2 medidos em campo em função do tempo (AZAMBUJA et al., 2003)

A localização em planta baixa da seção transversal escolhida pode ser vista na figura 15. Na figura 16, mostra-se uma seção típica da obra nos pontos mais críticos.

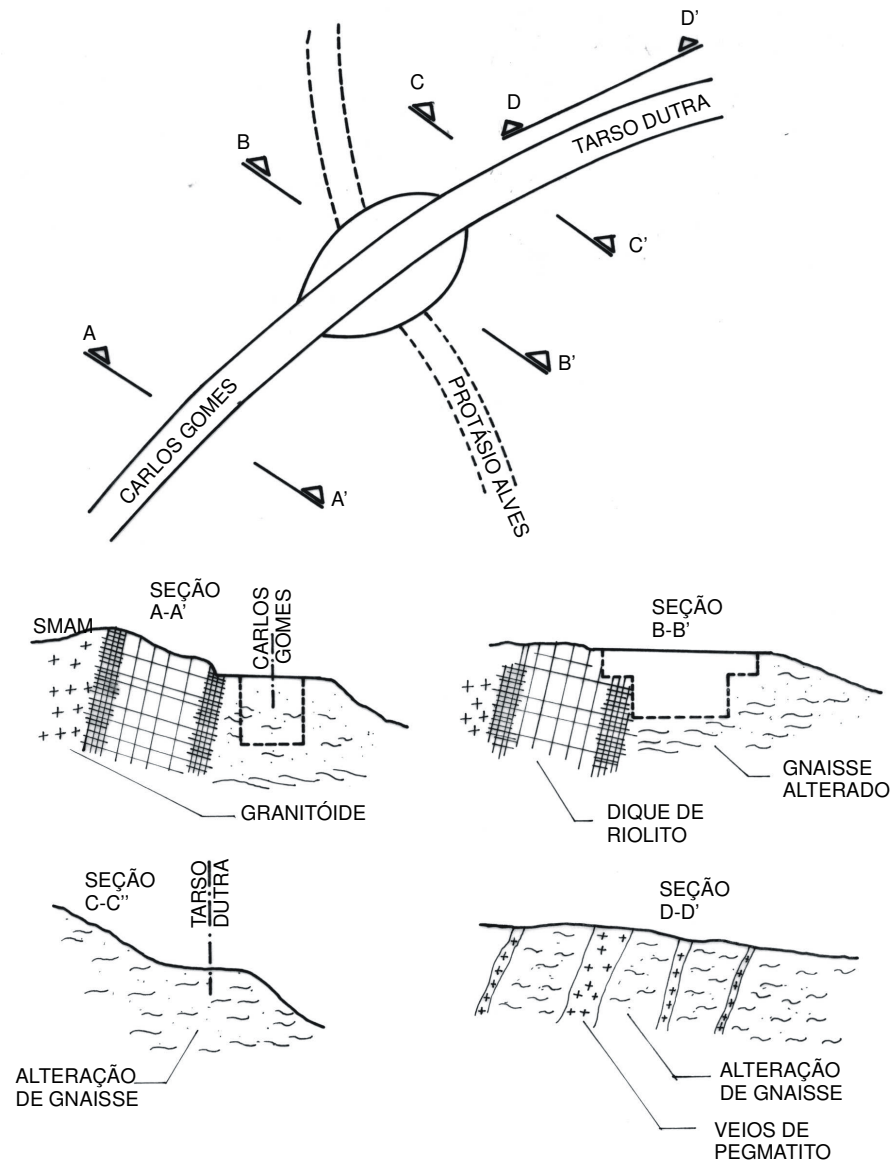


Figura 14: seções típicas, quanto à formação geológica, encontradas nas escavações da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral (AZAMBUJA et al., 2003)



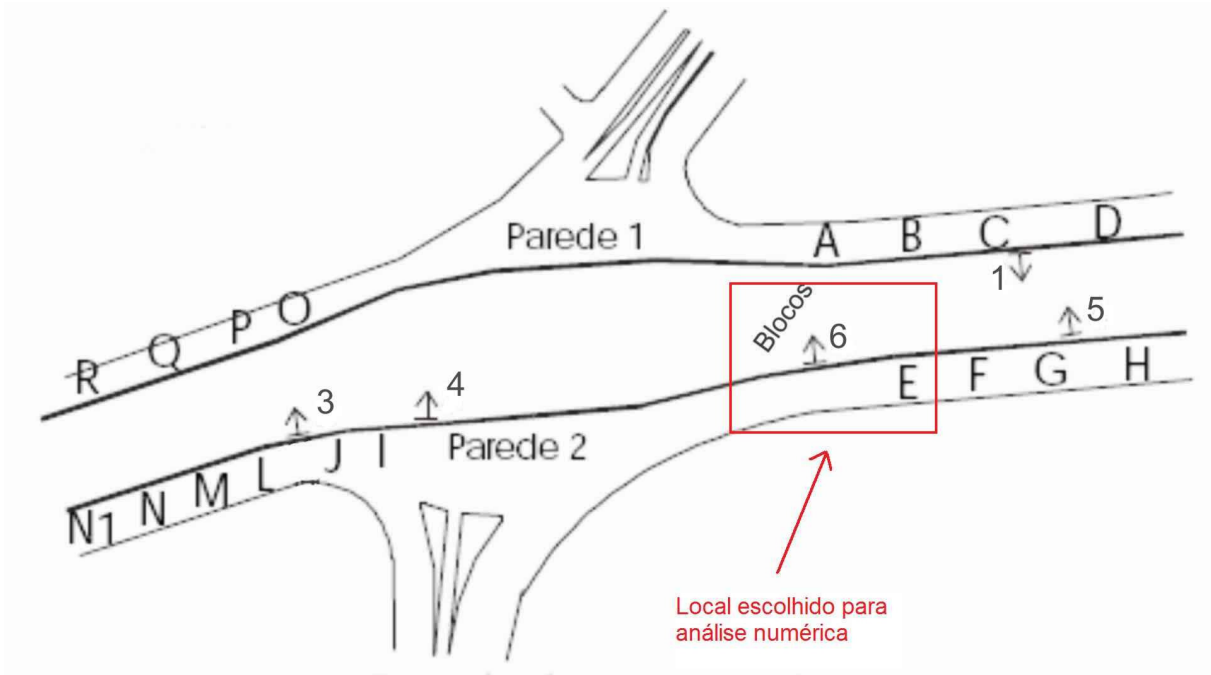


Figura 15: pontos onde foram realizados o controle e a instrumentação da obra e a posição de escolha da seção transversal para estudo. As letras nesta figura representam os pontos de monitoramento topográfico, enquanto os números representam os locais de ensaio de arrancamento de grampos. Também estão indicados os locais onde foram retirados os blocos de amostras indeformadas (adaptado de AZAMBUJA, 2003)

Justamente nesta seção da obra ocorreu a instalação de reforços com tubos metálicos preenchidos com nata de cimento sob pressão (semelhante a estacas horizontais). Porém, não se obtiveram dados dos diâmetros destes elementos e nem dos seus espaçamentos horizontais. Apenas encontraram-se os comprimentos destes elementos e as cotas de escavações. Estes reforços foram a solução adequada para controlar as deformações excessivas no SRGPA que estavam gerando trincas de tração observadas a montante da escavação. O dimensionamento destes elementos, no projeto original, originou-se de uma retroanálise realizada através de métodos de equilíbrio limite. A figura 17 mostra a seção transversal reforçada com estes tubos. Não se tem a data exata da inserção destes elementos, mas razoavelmente supõe-se que estes elementos foram instalados após o final da escavação do dia 29/mar onde se observa, pelo monitoramento, uma redução dos deslocamentos da parede (figura 13).

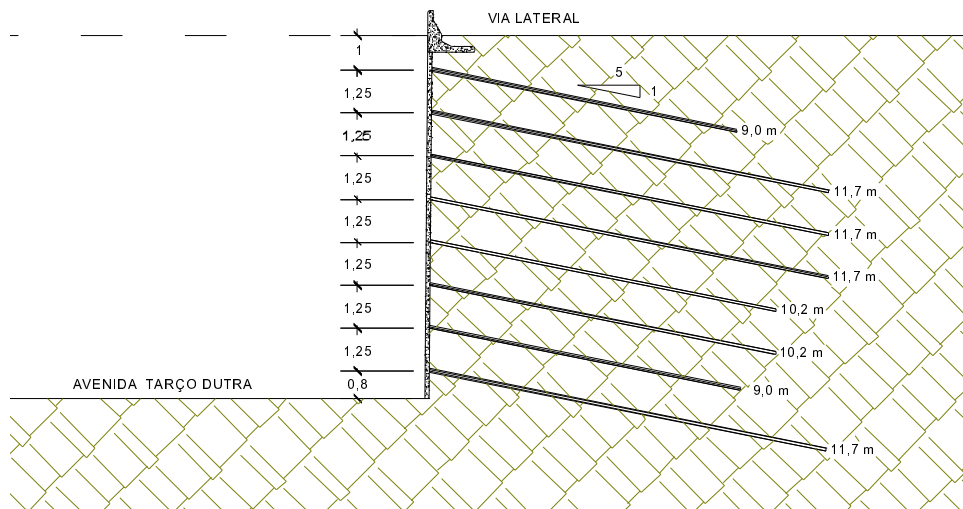


Figura 16: seção transversal típica nos pontos mais críticos considerados pelo projeto da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral (adaptado de AZAMBUJA, 2003)

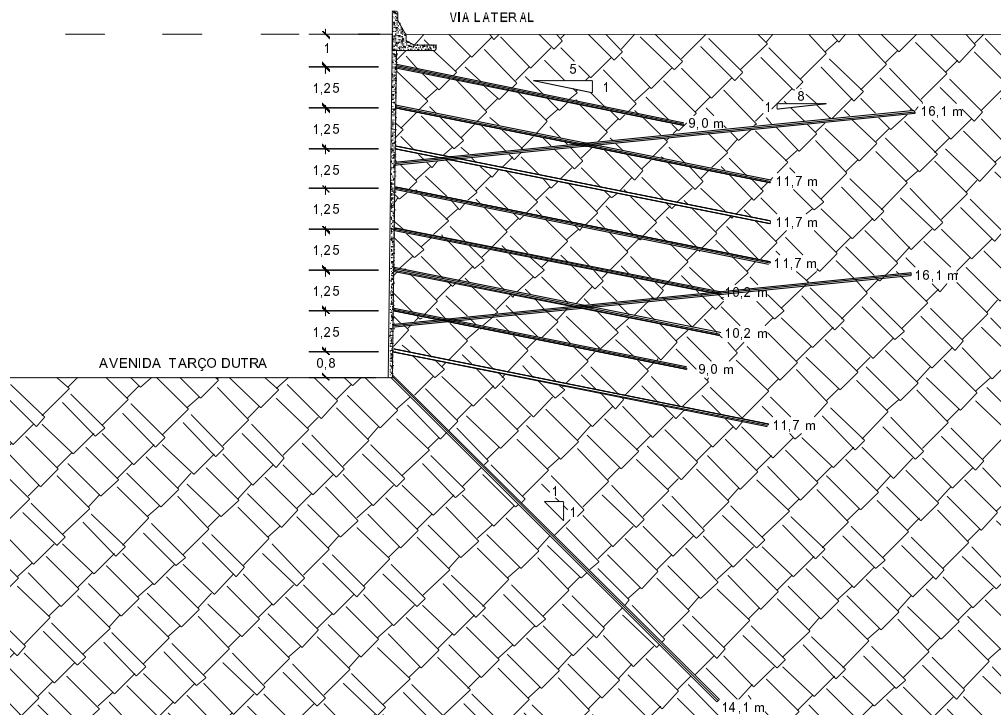


Figura 17: seção transversal reforçada após a observação de trincas de tração à montante da escavação (dimensões da retroanálise conforme projeto original)

## 7 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Neste capítulo apresentam-se as análises computacionais realizadas através do programa PLAXIS que é fundamentado no MEF (PLAXIS BV DELFT, 2003). Sua grande vantagem é de permitir a consideração de uma sequência construtiva, no caso deste trabalho, a sequência de escavação da obra em solo grampeado. Esta ferramenta de cálculo é bastante difundida em análises de projetos quando se precisa conhecer o comportamento tensão-deformação da estrutura. Segundo Brinkgreve e Vermeer (1998 apud SARÉ, 2007) este programa foi desenvolvido para análises de problemas bidimensionais. O programa dispõe de rotinas de pré e pós-processamento podendo ser adotados elementos triangulares de 6 ou 15 nós. As análises podem ser feitas apenas no plano ou podem ser axisimétricas (condições de fronteira rotacionadas). Utilizou-se a versão 8.2 do programa PLAXIS neste trabalho, para a qual não há limite de elementos. Esta versão possui alguns modelos constitutivos como o modelo elástico linear, o modelo elástico perfeitamente plástico, e o modelo com endurecimento do solo (HS), para possibilitar a representação da relação tensão-deformação dos materiais utilizados na análise (SARÉ, 2007).

### 7.1 MODELO NUMÉRICO

Para que a análise pelo MEF se tornasse mais realista com relação às condições esperadas dos estados de tensões de campo, discretizou-se em cinco camadas a geometria da seção analisada tomando-se as profundidades médias destas camadas. Para cada camada calculou-se um módulo de deformabilidade elástico secante para a condição de descarregamento lateral, mobilizado em função das escavações que geram descompressão lateral no solo. Este módulo aumenta em função da raiz quadrada da tensão de confinamento, ou seja, à medida que a escavação avança em profundidade no solo, o material torna-se mais rígido. A figura 18 mostra um gráfico relacionando esta variação do módulo com a profundidade.

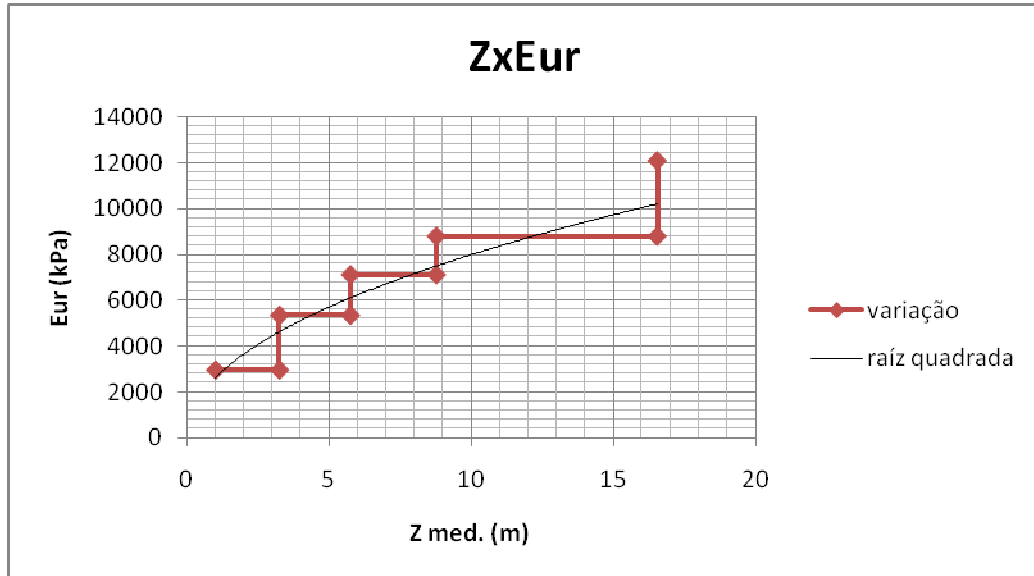


Figura 18: gráfico representativo da variação do módulo de deformabilidade na condição de descarregamento lateral com a profundidade.

Para chegar aos valores dos módulos de deformabilidade, na condição de descarregamento lateral do solo, utilizados nas análises pelo MEF, foram realizados os passos de cálculo descritos nas alíneas a seguir, tendo como base os resultados dos ensaios triaxiais descritos por Gobbi (2005):

- a) divide-se a massa de SRGPA em cinco camadas;
- b) toma-se a profundidade média de cada camada;
- c) calcula-se a tensão geostática horizontal no centro de cada camada (equação 2);
- d) utiliza-se a pressão de confinamento de referência de 100 kPa no correspondente ensaio triaxial. Foi necessário realizar uma interpolação das curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais com tensões de confinamento efetivas de 60 kPa e 120kPa;
- e) determina-se graficamente o módulo de deformabilidade na condição de carregamento cuja tensão desvio representa 50% da tensão desvio de ruptura, denominado de  $E_{50}$  (figura 19);
- f) para cada camada, calcula-se um módulo  $E_{50}$  de referência ( $E_{50r}$ ) de acordo com a equação 3;

g) por fim, multiplica-se o valor do módulo  $E_{50r}$  de carregamento por 4 (PLAXIS BV DELF, 2003) para obter-se o módulo de deformabilidade na condição de descarregamento do solo em cada camada ( $E_{ur}$ ).

$$\sigma = k_o \gamma_t Z_{med} \quad (2)$$

Onde:

$k_o = 1 - \text{sen}\phi'$ , sendo  $\phi'$  = ângulo de atrito interno do solo;

$\gamma_t$  = peso específico natural do solo;

$Z_{med}$  = profundidade média da camada.

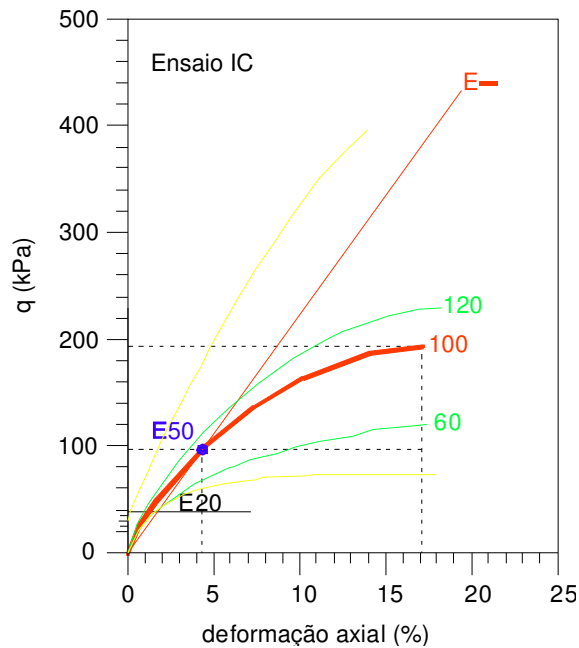


Figura 19: Interpolação das curvas tensão-deformação do ensaio triaxial para obtenção da tensão confinante de referência de 100 kPa, tomando como exemplo os resultados do ensaio IC

$$E_{50r} = E_{50} (\sigma / \sigma_{ref})^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

$E_{50}$  = módulo de deformabilidade na condição de carregamento a 50% da tensão desvio máxima no ensaio triaxial com tensão de confinamento efetiva de 100 kPa;

$\sigma$  = tensão geostática horizontal;

$\sigma_{ref} = 100\text{kPa}$ .

Os cálculos para a obtenção dos módulos  $E_{ur}$  foram feitos para os ensaios IC e IV. Posteriormente, foi possível obter um bom ajuste dos valores dos módulos, tendo como referência as deformações que ocorreram paralelas ao tardo do faceamento em concreto projetado nas análises pelo MEF. Após, com as deformações avaliadas pelo programa PLAXIS e voltando às curvas dos ensaios triaxiais com tensão de confinamento efetiva de 100 kPa, foi possível observar que as deformações encontradas no modelo utilizando  $E_{50}$  são provocadas por tensões desvio da ordem de 20% da tensão desvio de ruptura, ou seja, pode-se considerar novos valores de módulo de deformabilidade ( $E_{20}$ ) que consequentemente geram deformações nas análises mais compatíveis com as do maciço de SRGPA (figura 19). Cabe salientar que os valores de  $E_{20}$  foram obtidos graficamente, onde existe uma escala de valores bastante sensível. Portanto, devem-se considerar estes valores dos módulos de deformabilidade corrigidos como sendo aproximados.

Para cada análise pelo MEF foram geradas algumas malhas de elementos triangulares de 15 nós. Estas malhas foram sendo refinadas, sendo consideradas pelo programa PLAXIS como refino em densidade média de elementos, principalmente nas proximidades dos grampos e da parede de concreto projetado. Foram necessárias duas a três iterações de refinamento, sendo que, como critério adotado, os valores de deslocamentos totais correspondentes ao último refinamento não ultrapassaram em 1 mm os deslocamentos totais obtidos do refinamento anterior. A figura 20 mostra um exemplo de geração desta malha.

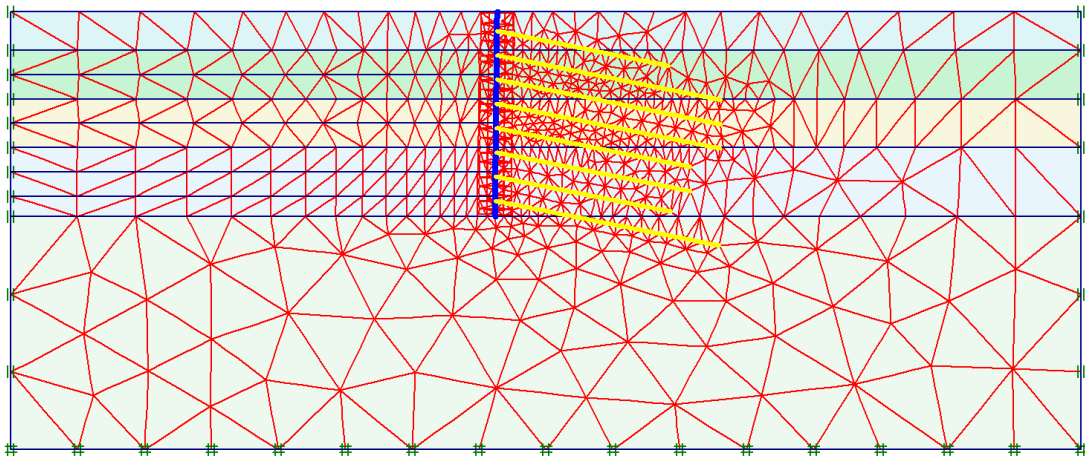


Figura 20: geometria e malha de elementos finitos utilizadas nas análises pelo programa PLAXIS

### 7.1.1 Parede de Concreto Projetado

Além da escolha do modelo constitutivo do SRGPA a ser analisado, o programa PLAXIS permite que se analise a face de concreto projetado como um elemento de barra, seccionado ao longo da sequência construtiva da escavação. Neste tipo de elemento informam-se as propriedades do módulo de rigidez axial ( $EA$ ), do módulo de rigidez a flexão ( $EI$ ), do peso específico ( $\gamma$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Os valores calculados e utilizados destes parâmetros estão descritos nas análises a seguir. Porém, para a consideração do módulo de elasticidade do concreto projetado, este foi estimado através da equação 4 da norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003):

$$E=5600 \times (f_{ck})^{1/2} \quad (4)$$

Onde:

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto projetado. Foi adotado o valor  $f_{ck}=25$  MPa

Quanto ao peso relativo leva-se em conta a sobreposição dos pesos específicos do solo e do concreto projetado. Esta sobreposição pode ser calculada de acordo com a equação 5 (PLAXIS BV DELFT, 2003):

$$w = e \times (\gamma_c - \gamma_t) \quad (5)$$

Onde:

$e$  = espessura da parede de concreto projetado. Esta foi especificada em 12 cm pelo projeto original;

$\gamma_c$  = o peso específico natural do concreto adotado em 25 kN/ m<sup>3</sup>;

$\gamma_t$  = peso específico natural do solo, adotado em 16 kN/m<sup>3</sup>.

Foi adotado este valor para o peso específico natural do SRGPA baseado em uma média aritmética dos pesos específicos determinados por Gobbi (2005) nos corpos de prova das amostras indeformadas dos ensaios triaxiais. Por outro lado, o peso específico do concreto adotado nesta análise é um valor usual em projetos de estruturas de concreto armado.

### 7.1.2 Grampos e Reforços

As características dos grampos e dos reforços são elementos importantes para a validação das análises numéricas realizadas neste trabalho de diplomação, com forte influência nas deformações da estrutura em solo grampeado. No programa PLAXIS (PLAXIS BV DELFT, 2003) pode-se realizar a análise considerando os grampos de duas maneiras:

- a) considerar o grampo como **elemento de barra**, atribuindo a sua rigidez axial e à flexão, juntamente com a definição de elementos de interface com o solo;
- b) ou considerar como **elemento geotêxtil** e definir apenas uma rigidez axial adequada para o sistema. Pode-se também definir elementos de interface com o solo.

Saré (2007) considerou em sua tese a utilização de elementos geotêxteis enquanto que Henriques (2007) utiliza elementos de barra com correção paramétrica afirmando, entretanto, não obter bons resultados com os mesmos.



Gerscovich et al. (2005) realizaram estudos comparativos utilizando elementos de barras e elementos geotexteis com e sem interface para um sistema em solo grampeado hipotético analisado com o programa PLAXIS. Os autores chegaram à conclusão que a utilização do elemento de interface, juntamente com a rigidez à flexão, para níveis inferiores à condição de ruptura e para barras com diâmetros pequenos tem pouca influência no comportamento mecânico do sistema.

Chaoui (1992 apud SARÉ, 2007) realizou estudos comparativos entre análises em 3 dimensões e 2 dimensões e constatou que os efeitos tridimensionais são significativos nas análises numéricas. Neste trabalho, consideraram-se os grampos como elementos geotexteis sem utilização de elementos de interface.

No programa PLAXIS, o elemento geotextil é tratado como um elemento contínuo, onde sua rigidez axial é dada por metro linear. Saré (2007) realizou análises em duas dimensões no programa PLAXIS fazendo aproximações para uma estrutura real em três dimensões. No presente trabalho, o autor obteve resultados relativamente satisfatórios, com margem de erro de 15 a 30% em comparação aos deslocamentos reais da estrutura em solo grampeado analisada. De fato, a rigidez axial em duas dimensões de um elemento contínuo não é equivalente à rigidez de grampos discretizados. Entretanto, quando se trata de grampos com grandes comprimentos e espaçamentos relativamente pequenos – com relação de aproximadamente 1/10 no presente trabalho e até de 1/15 em alguns grampos estudados por Saré (2007) – pode-se aproximar a discretização simplesmente dividindo a rigidez axial pelo espaçamento horizontal,  $S_h$ .

Saré (2007) propôs uma metodologia para simular os grampos como elementos geotexteis e para calcular o módulo de elasticidade equivalente de cada grampo. O autor calculou uma média ponderada dos módulos de elasticidade da barra de aço e da nata de cimento, onde os pesos são as áreas destes materiais. Neste trabalho, em vez de utilizar um módulo equivalente, propôs-se utilizar a rigidez equivalente seguindo a equação 6:

$$EA = (EA_{nata} \times A_{nata} + EA_{aço} \times A_{aço}) / A_{furo} \quad (6)$$

Onde:

$EA_{nata}$  = rigidez axial da nata cimento, sendo E da nata calculado pela equação 1;

$A_{nata}$  = área da seção transversal do furo preenchida por nata de cimento;

$EA_{aço}$  = rigidez axial do aço, com  $E=210\text{GPa}$ ;

$A_{aço}$  = soma das áreas das seções transversais das barras de aço;

$A_{furo}$  = área do furo.

Para as análises deste trabalho, foram utilizados furos de diâmetro 100 mm e 3 feixes de barras de aço CA50 de 20 mm. Por falta de informações mais precisas do diâmetro dos reforços, considerou-se, para tais, a mesma rigidez axial dos grampos. Os valores de rigidez encontrados, tanto para os grampos quanto para os reforços, foram divididos pelo espaçamento horizontal ( $S_h$ ). Este valor de  $S_h$ , como consta no projeto original, foi de 1,25 m.

### 7.1.3 Parâmetros geotécnicos do SRGPA

Foram escolhidos, para este trabalho, dois modelos constitutivos aplicados ao SRGPA: em análise elástica linear e em análise elástica perfeitamente plástica com critério de ruptura de Mohr-Coulomb para o SRGPA. Este modelo exige a definição de cinco parâmetros fundamentais: ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), coesão ( $c$ ), ângulo de dilatância ( $\psi$ ), módulo de elasticidade de referência ( $E_{ref}$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (PLAXIS BV, 2003). Por outro lado, o modelo elástico linear exige fundamentalmente o módulo de elasticidade de referência ( $E_{ref}$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). A figura 21 mostra a consideração do modelo elástico perfeitamente plástico em comparação com o resultado de um ensaio traixial.

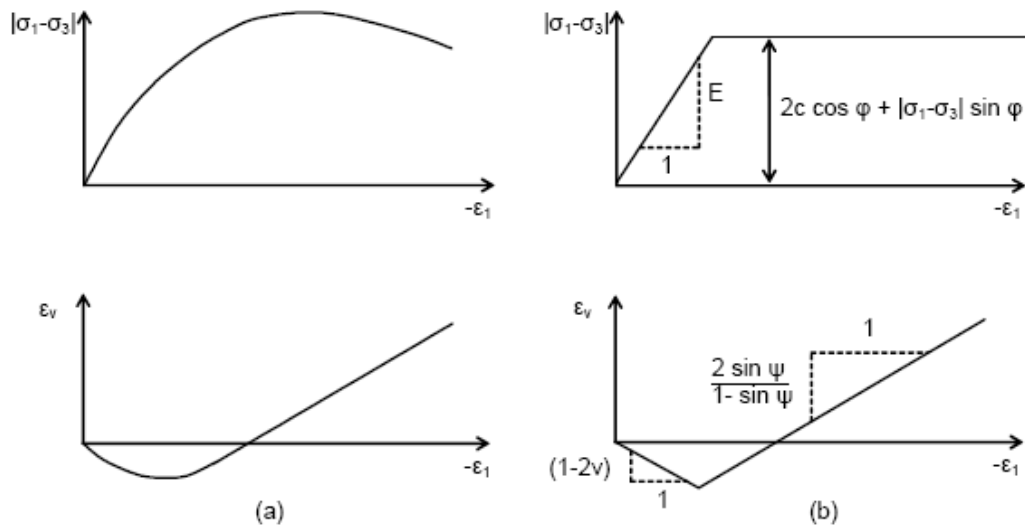


Figura 21: comparação entre resultados típicos de ensaios triaxiais (a) com as curvas do modelo elástico perfeitamente plástico (b) (PLAXIS BV DELFT, 2003)

Para todas as análises pelo MEF foram adotados os valores de  $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$  (GOBBI, 2005),  $\nu=0,2$  (SARÉ, 2007) e  $\psi=0^\circ$ , já que os ensaios triaxiais de Gobbi (2005), realizados no SRGPA, não apresentaram dilatância. Foram adotados, também, os parâmetros de resistência ao cisalhamento retroanalisados por Azambuja et al. (2003). Neste caso, tem-se  $\phi=20^\circ$  e  $c=4,5 \text{ kPa}$  com o intuito de representar o critério de ruptura encontrado em campo, representado pelos valores mais baixos dos parâmetros geotécnicos de todas as correlações com ensaios de campo, ensaio de laboratório e também das retroanálises. Cabe salientar, que estes mais baixos valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento podem representar os parâmetros das discontinuidades preenchidas por argila encontradas no maciço do SRGPA durante as escavações da obra da Terceira Perimetral. Os valores dos demais parâmetros necessários para a entrada de dados no programa estão descritos nos quadros de cada análise a seguir.

## 7.2 ANÁLISE IC

Para as análises numéricas do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado utilizando as condições de ensaio IC (bandamentos a  $55^\circ$  em relação à tensão desvio) foi gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6. Os parâmetros de entrada no programa PLAXIS, para esta análise elástica perfeitamente plástica,

estão descritos no quadro 8. Porém, para a análise no modelo linear elástico não se utiliza os parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA, ou seja, não há critério de ruptura.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			2,98E+03	kPa
	2			5,36E+03	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	7,14E+03	kPa
	4			8,81E+03	kPa
	5			1,21E+04	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado				3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 8: parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IC

### 7.3 ANÁLISE IV

Para as análises numéricas do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IV (bandamentos a 0° em relação à tensão desvio) foi gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6. A análise linear elástica e linear perfeitamente plástica são realizadas com os mesmos procedimentos do item 7.2. Porém, ao invés de utilizar os módulos IC, utiliza-se os módulos IV. Porém, na análise utilizando o modelo linear elástico não se utiliza os parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA, ou seja, não há critério de ruptura.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			1,36E+04	kPa
	2			2,46E+04	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	3,27E+04	kPa
	4			4,04E+04	kPa
	5			5,54E+04	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado				3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 9: parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IV

## 7.4 ANÁLISE IC COM REFORÇOS

Para as análises numéricas do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IC (bandamentos a 55° em relação à tensão desvio) foi gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6. Os parâmetros de entrada no programa PLAXIS, para a análise elástica perfeitamente plástica, estão descritos no quadro 10. Porém, da mesma forma que no item 7.3, na análise utilizando o modelo linear elástico não se utiliza os parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA, ou seja, não há critério de ruptura. Ressalta-se que para as análises com reforços, os elementos reforços foram considerados como grampos por não se obter dados completos deste.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			2,98E+03	kPa
	2			5,36E+03	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	7,14E+03	kPa
	4			8,81E+03	kPa
	5			1,21E+04	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado			EA	3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Reforço		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 10: parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IC com reforços

## 7.5 ANÁLISE IV COM REFORÇOS

Para as análises numéricas do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IV (bandamentos a 0° em relação à tensão desvio) foi gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6. A análise linear elástica e linear perfeitamente plástica são realizadas com os mesmos procedimentos do item 7.4. Porém, ao invés de utilizar os módulos IC, utilizam-se os módulos IV.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			1,36E+04	kPa
	2			2,46E+04	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	3,27E+04	kPa
	4			4,04E+04	kPa
	5			5,54E+04	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado			EA	3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Reforço		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 11: parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IV com reforços

## 7.6 CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IC

Para a análise numérica do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IC foi, como anteriormente, gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6.

Com a correção dos módulos de deformabilidade partindo dos níveis de deformações mais baixos gerados pelas análises anteriores (com módulos  $E_{50}$ ), chega-se a módulos mais elevados (ver item 7.1). Os dados paramétricos de entrada no programa PLAXIS, para a análise utilizando o modelo elástico perfeitamente plástico, estão descrito no quadro 12.

O processo de obtenção dos valores dos módulos de deformabilidade foi o mesmo para os próximos itens 7.7, 7.8 e 7.9.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			4,09E+03	kPa
	2			7,74E+03	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	1,08E+04	kPa
	4			1,34E+04	kPa
	5			2,11E+04	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado				3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 12: parâmetros de entrada de dados dos elementos constituintes da análise IC com correção dos módulos

## 7.7 CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IV

Para a análise numérica do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IV foi, como anteriormente, gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6.

Os dados paramétricos de entrada no programa PLAXIS, para esta análise elástica perfeitamente plástica, estão descritos no quadro 13.



Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			2,55E+04	kPa
	2			5,15E+04	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	4,06E+04	kPa
	4			6,41E+04	kPa
	5			1,06E+05	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado				3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 13: parâmetros dos elementos constituintes da análise IV com correções dos módulos

## 7.8 CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IC COM REFORÇOS

Para a análise numérica do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IC foi, como nos itens anteriores, gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6.

Os dados paramétricos de entrada no programa PLAXIS, para esta análise elástica perfeitamente plástica, estão descritos no quadro 14.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			4,09E+03	kPa
	2			7,74E+03	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	1,08E+04	kPa
	4			1,34E+04	kPa
	5			2,11E+04	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado			EA	3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Reforço		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 14: parâmetros de dados de entrada dos elementos constituintes da análise IC com reforços e correção dos módulos

## 7.9 CORREÇÃO DE MÓDULOS PARA IV COM REFORÇOS

Para a análise numérica do comportamento mecânico da estrutura em solo grampeado, utilizando as condições de ensaio IC, também foi gerada a malha de elementos finitos com base na geometria descrita no capítulo 6.

Os dados paramétricos de entrada no programa PLAXIS, para esta análise elástica perfeitamente plástica, estão descritos no quadro 15.

Elemento	Camada	Elemento Estrutural	Parâmetro	Valor	Unidade
Solo	1			2,55E+04	kPa
	2			5,15E+04	kPa
	3	Mohr Coulomb	Eur	4,06E+04	kPa
	4			6,41E+04	kPa
	5			1,06E+05	kPa
Grampo		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Concreto Projetado			EA	3,36E+06	kN/m
		Barra	EI	4032	kN.m <sup>2</sup> /m
			w	1,08	kN/m
			v	0,2	-
Reforço		geotêxtil	EA	1,19E+05	kN/m
Parâmetros de resistência ao cisalhamento do SRGPA			Ψ	0	°
			φ'	20	°
			c'	4,5	kPa
peso específico natural			γ	16	kN/m <sup>3</sup>

Quadro 15: parâmetros de dados de entrada dos elementos constituintes da análise IV com reforços e correção dos módulos

## 8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das análises numéricas realizadas com os modelos constitutivos elástico linear e elástico perfeitamente plástico, juntamente com os comentários. Estes resultados referem-se basicamente às análises do comportamento mecânico da estrutura de solo grampeado através das variações estruturais e paramétricas apresentadas no Capítulo 7. Os principais resultados foram comparados com o monitoramento da obra, conforme descrito no capítulo 6.

A intenção principal de realizar essas análises numéricas foi obter o limite inferior e o limite superior para os deslocamentos experimentados pela estrutura. Quando levados em consideração os módulos de deformabilidade para a condição IC, com o bandamento do SRGPA na orientação encontrada em campo, tem-se o limite inferior de rigidez do SRGPA, enquanto que, para a condição IV, tem-se o limite superior.

Também foi possível obter, através das análises numéricas, as solicitações que atuam nos grampos. Após calculadas pelo programa PLAXIS, as solicitações foram comparadas com os resultados dos ensaios de arrancamento de grampos, realizados na obra da Terceira Perimetral.

### 8.1 ANÁLISES ELÁSTICAS LINEARES

As análises elásticas lineares foram realizadas com o objetivo de obter os menores deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado. Para isso, foram analisados os comportamentos da estrutura utilizando os módulos de deformabilidade nas condições IC e IV sem os elementos de reforços e com os reforços. Cabe observar que, nestas análises, as escalas de deslocamentos horizontais das figuras estão fixadas num máximo de  $60 \cdot 10^{-3}$  m (6 cm).

Para a análise elástica linear utilizando os módulos de deformabilidade IC sem reforços, os deslocamentos horizontais máximos da estrutura em solo grampeado ficaram na ordem de 5,4

cm no topo da escavação. A figura 22 mostra a distribuição dos deslocamentos horizontais desta estrutura com a profundidade.

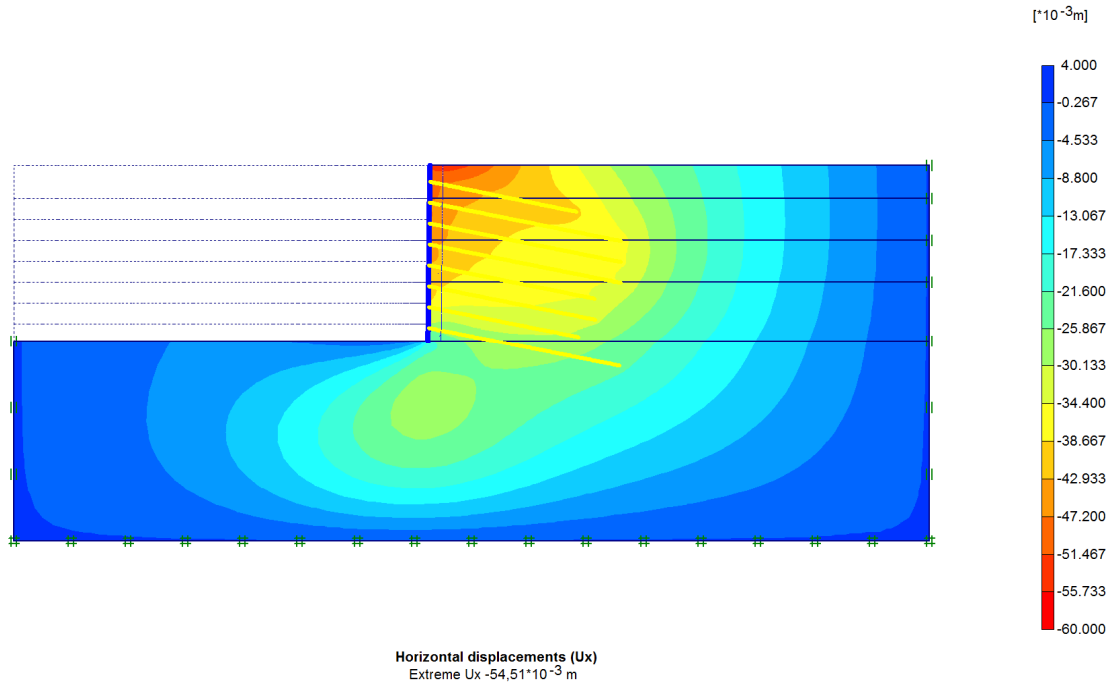


Figura 22: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IC

Para análise elástica linear utilizando os módulos de deformabilidade IV sem reforços, os deslocamentos horizontais máximos da estrutura em solo grampeado ficaram na ordem de 1,4 cm no topo da escavação. A figura 23 mostra a distribuição dos deslocamentos horizontais com a profundidade.

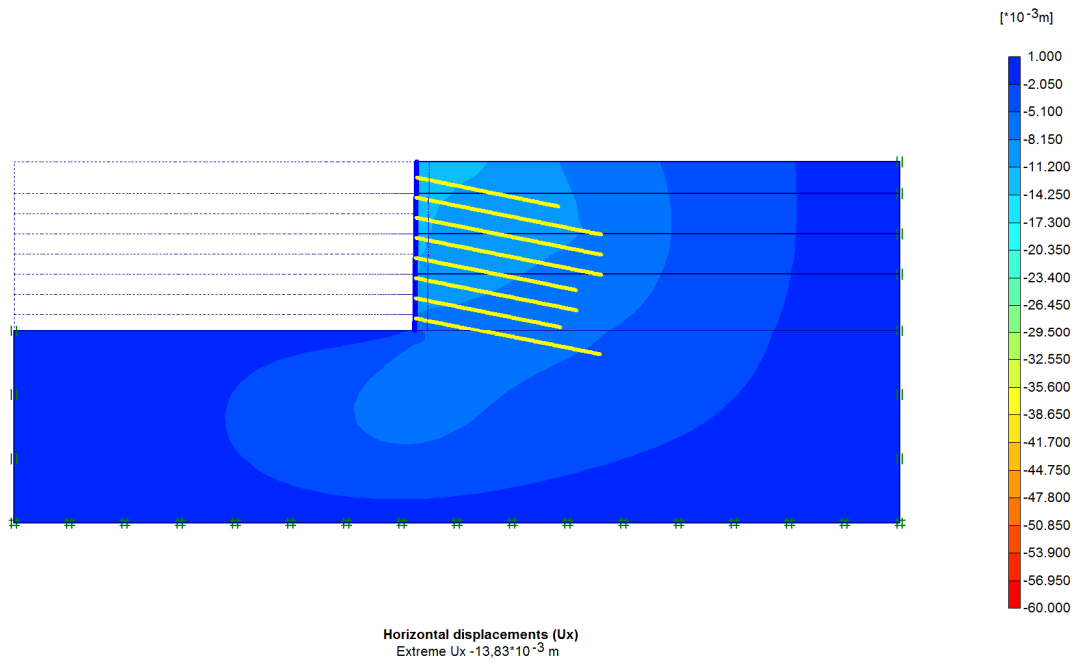


Figura 23: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IV

Para a análise elástica linear utilizando os módulos de deformabilidade IC com reforços, os deslocamentos horizontais máximos ficaram na ordem de 4,8 cm no topo da escavação. A figura 24 mostra a distribuição dos deslocamentos horizontais com a profundidade.

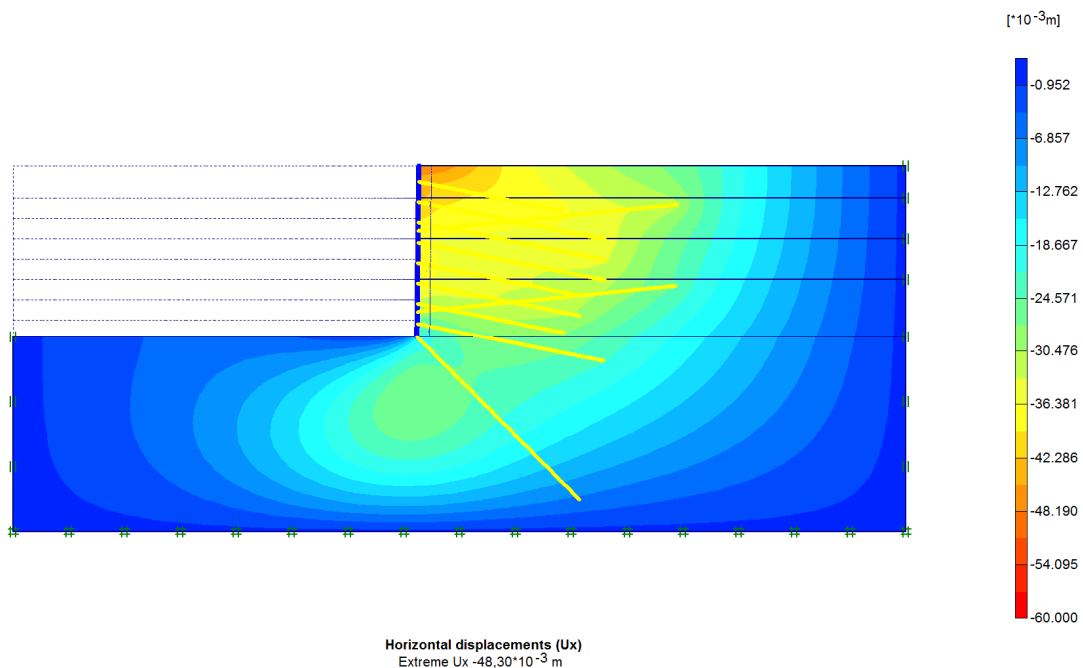


Figura 24: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IC com reforços

Para a análise linear elástica utilizando os módulos IV com reforços, os deslocamentos horizontais máximos ficaram na ordem de 1,2 cm no topo da escavação. A figura 25 mostra a distribuição dos deslocamentos horizontais.

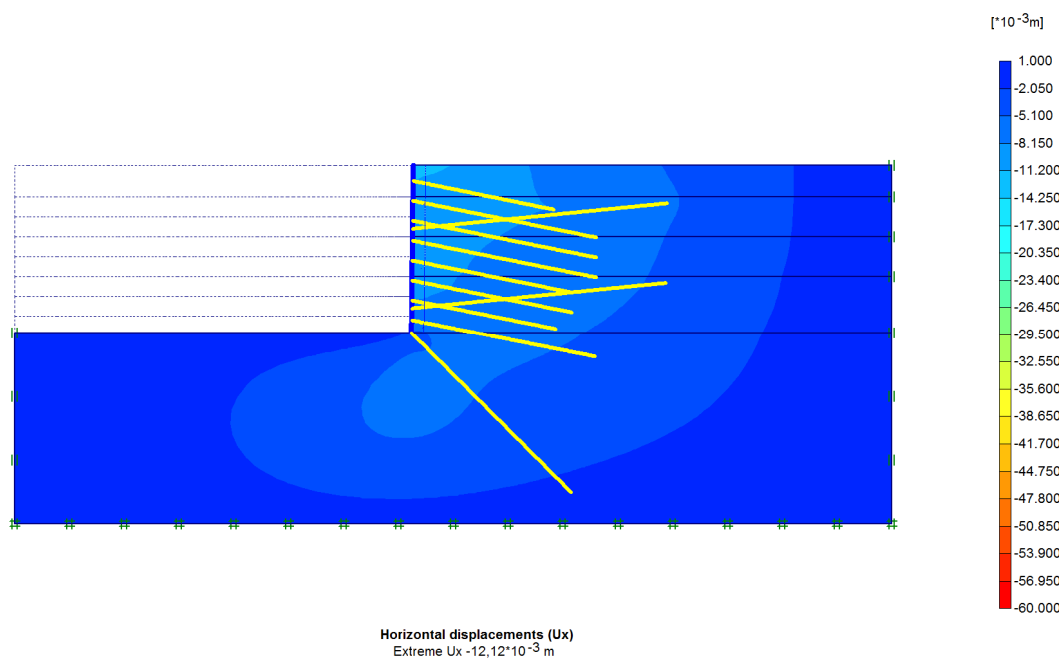


Figura 25: distribuição dos deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado determinados pela análise elástica linear IV com reforços

## 8.2 ANÁLISES ELÁSTICAS PERFEITAMENTE PLÁSTICAS

Nas análises elásticas perfeitamente plásticas da estrutura em solo grampeado, estudada neste trabalho de diplomação, apresentam-se as distribuições dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para todas as análises realizadas. Apesar da apresentação, neste capítulo, dos deslocamentos horizontais do sistema em solo grampeado, obtidos das análises com módulos de deformabilidade do SRGPA corrigidos em função da deformação de cisalhamento mobilizada, não se utilizaram estes resultados como dados conclusivos. Apenas, tomaram-se os resultados destas análises como referência para avaliação dos pontos de plastificação do sistema em solo grampeado.

Cabe observar que a escala dos deslocamentos horizontais da estrutura para as análises deste item 8.2 são diferentes para as análises IC e IV. Encontram-se o limite máximo de  $150.10^{-3}$  m

(15 cm), com exceção da análise IC (figura 27), onde o limite máximo da escala foi de  $160 \cdot 10^{-3}$  m (16 cm). Já para as análises IV, estes limites ficaram de  $100 \cdot 10^{-3}$  m (10 cm).

A figura 26 mostra a deformada da estrutura em solo grampeado determinada pela análise elástica perfeitamente plástica IC na última fase de escavação.

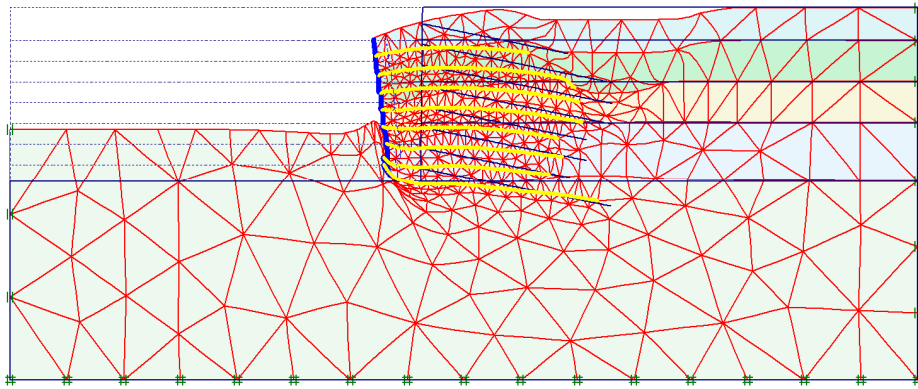


Figura 26: deformada da estrutura em solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 15,6 cm no topo da escavação. A figura 27 mostra a correspondente distribuição dos deslocamentos.

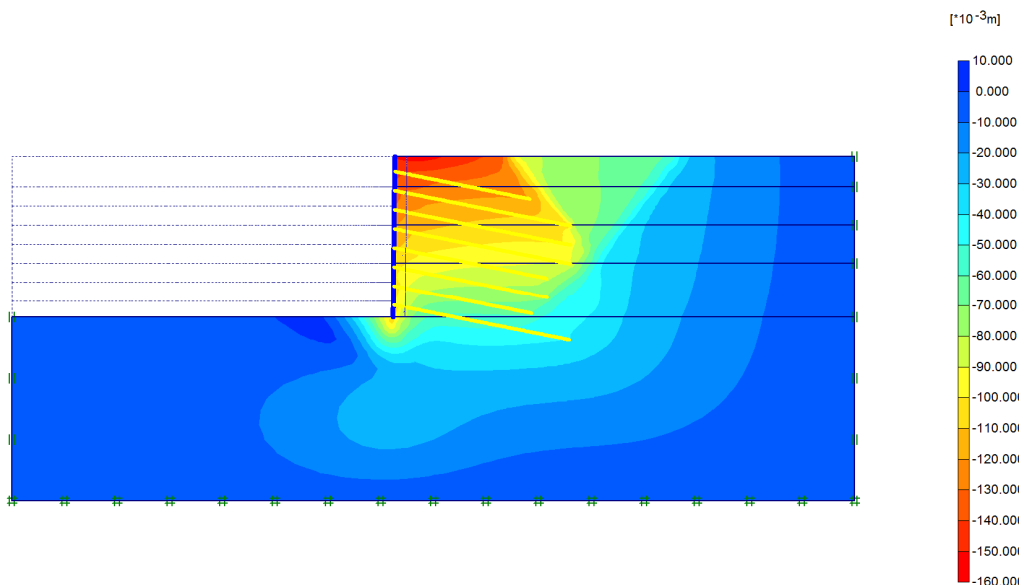


Figura 27: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IC



A figura 28 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeita plástica IV na última fase de escavação.

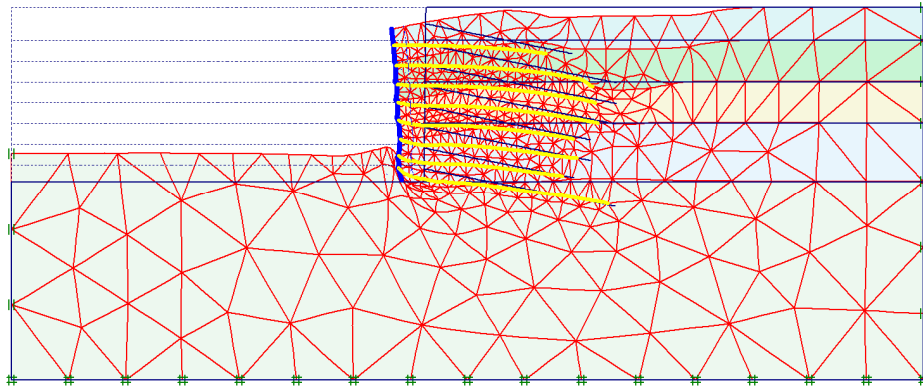


Figura 28: deformada da estrutura em solo grampeado para a análise elástica perfeita plástica IV.

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 4,2 cm no topo da escavação. A figura 29 mostra a correspondente distribuição dos deslocamentos.

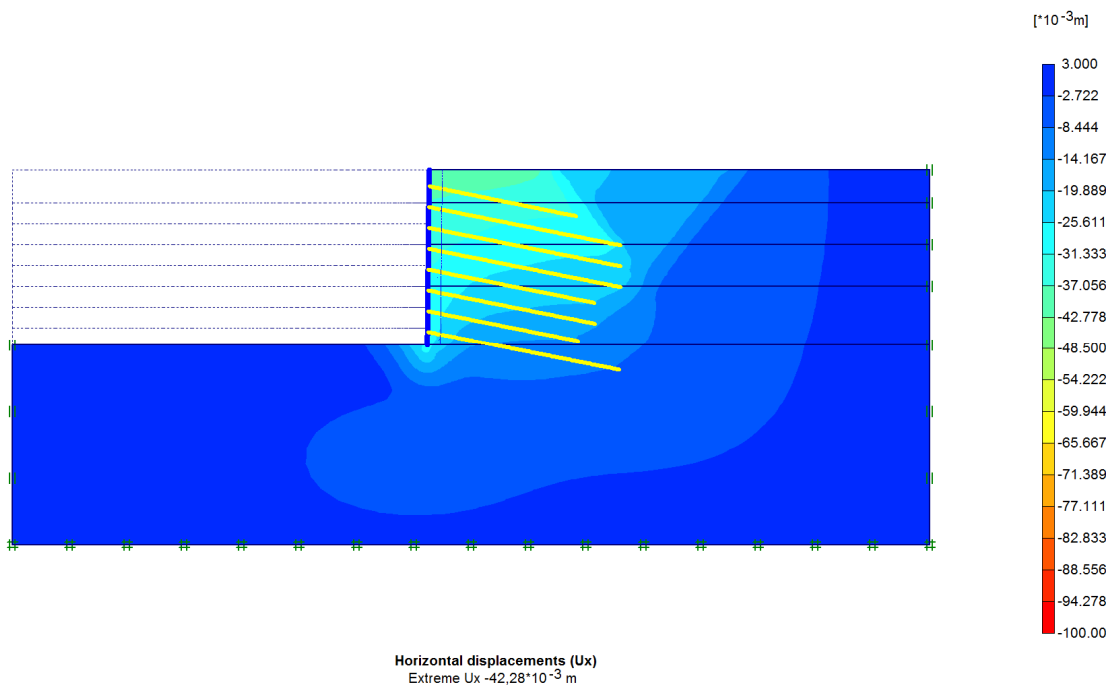


Figura 29: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeita plástica IV

A figura 30 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços na última fase de escavação.

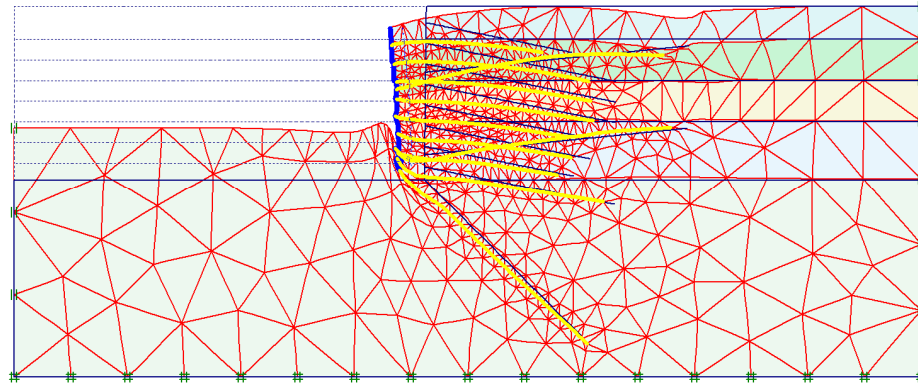


Figura 30: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 11,4 cm no topo da escavação. A figura 31 mostra a correspondente distribuição dos deslocamentos.

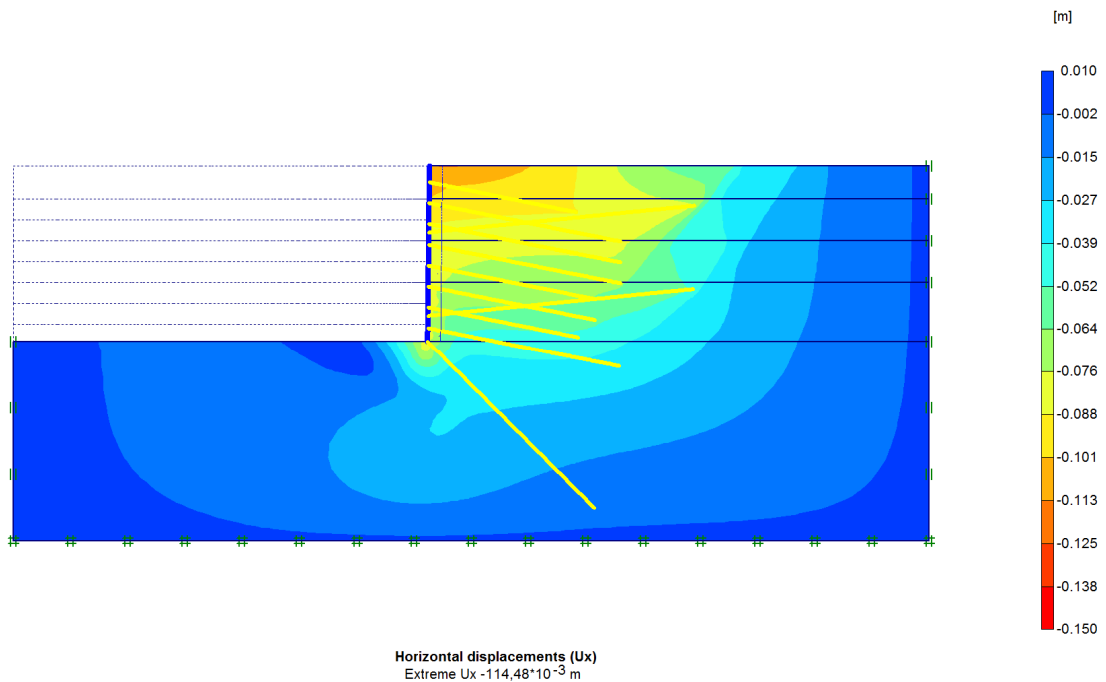


Figura 31: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços

A figura 32 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços na última fase de escavação.

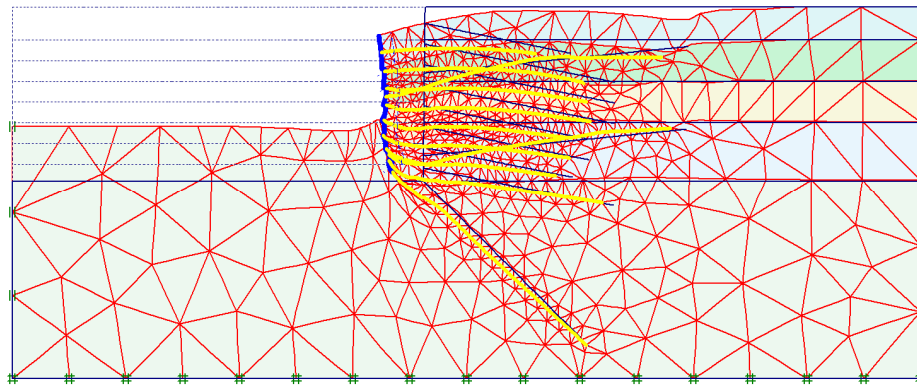


Figura 32: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 2,9 cm no topo da escavação. A figura 33 mostra a distribuição dos deslocamentos.

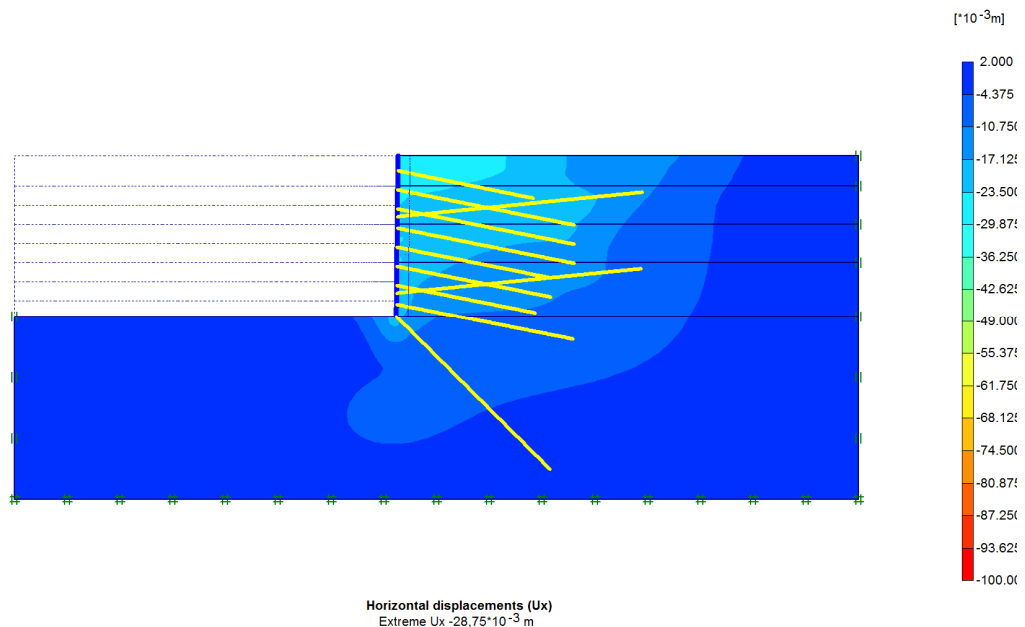


Figura 33: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços

### 8.3 ANÁLISE COM CORREÇÃO DOS MÓDULOS

A figura 34 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeitamente plástica IC com correção de módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada, na última fase de escavação (item 7.1).

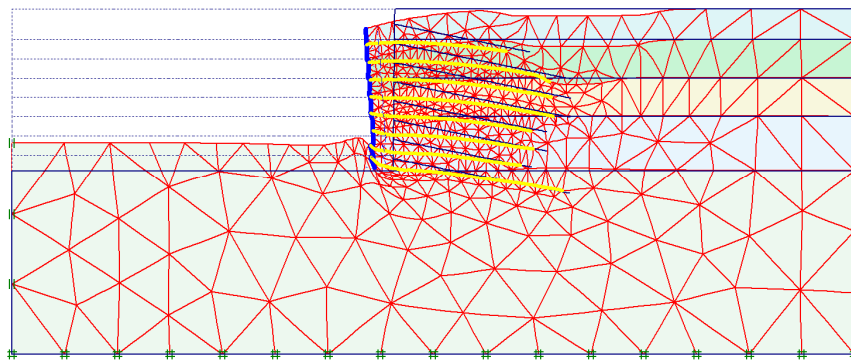


Figura 34: deformada da estrutura em solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA conforme a deformação de cisalhamento mobilizada

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 10,5 cm no topo da escavação. A figura 35 mostra a distribuição dos deslocamentos. Também, na figura 36, apresentam-se os pontos onde o SRGPA passa do regime elástico para o regime perfeitamente plástico.

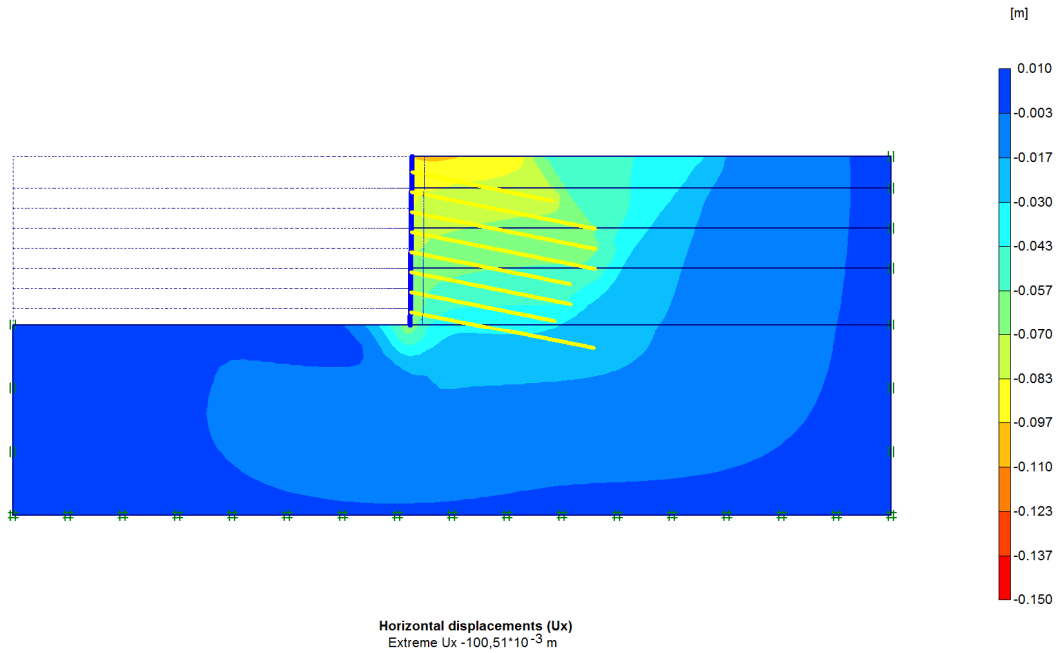


Figura 35: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede para a análise elástica perfeitamente plástica IC com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA conforme a deformação de cisalhamento mobilizada

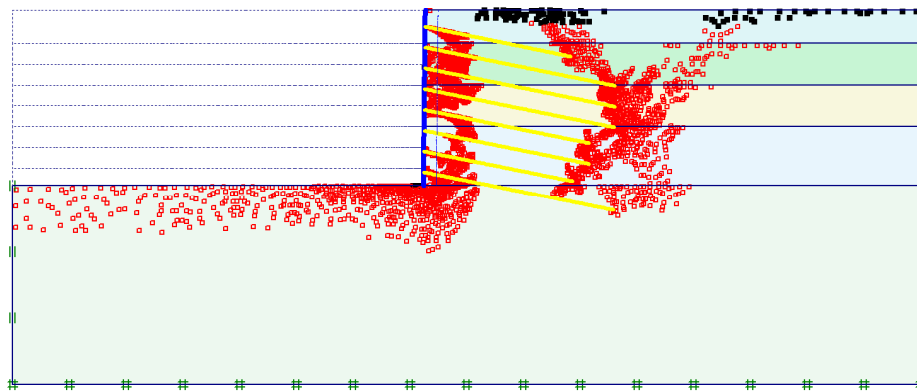


Figura 36: pontos de plastificação do SRGPA determinados pela análise elástica perfeitamente plástica IC com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA conforme a deformação de cisalhamento mobilizada

A figura 37 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeitamente plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada, na última fase de escavação.

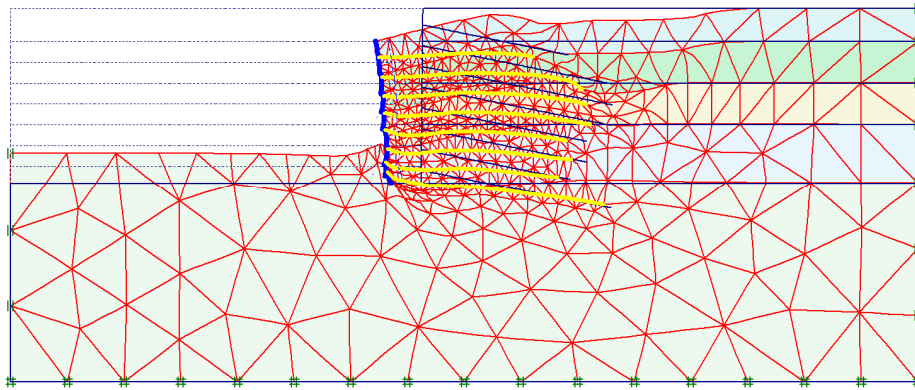


Figura 37: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeita-plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 2,9 cm no topo da escavação. A figura 38 mostra a distribuição dos deslocamentos. Também, na figura 39 apresentam-se os pontos onde o SRGPA passa do regime elástico para o regime perfeitamente plástico.

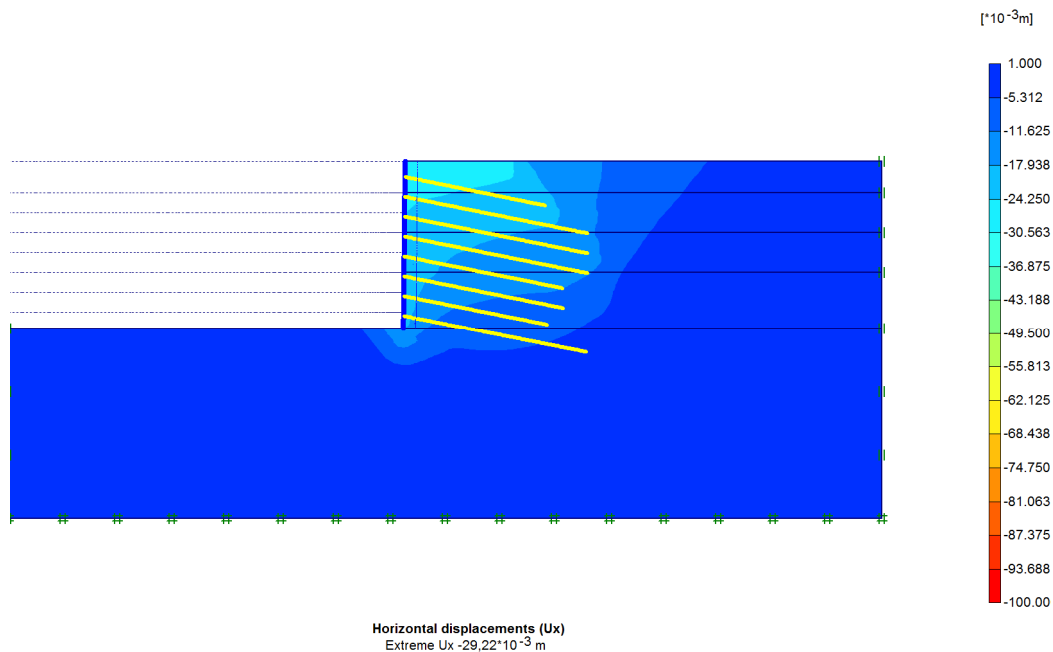


Figura 38: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeita-plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada

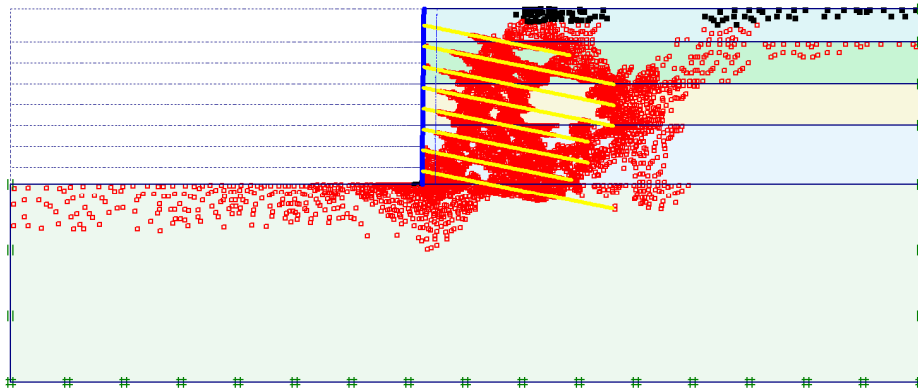


Figura 39: pontos de plastificação do SRGPA para a análise elástica perfeitamente plástica IV com correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada

A figura 40 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção de módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada, na última fase de escavação.

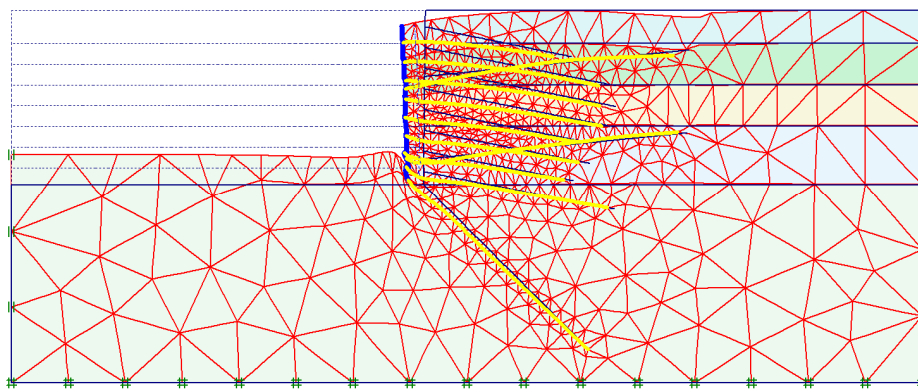


Figura 40: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 7,5 cm no topo da escavação. A figura 41 mostra a distribuição dos deslocamentos. Também, na figura 42 apresentam-se os pontos onde o SRGPA passa do regime elástico para o regime perfeitamente plástico.

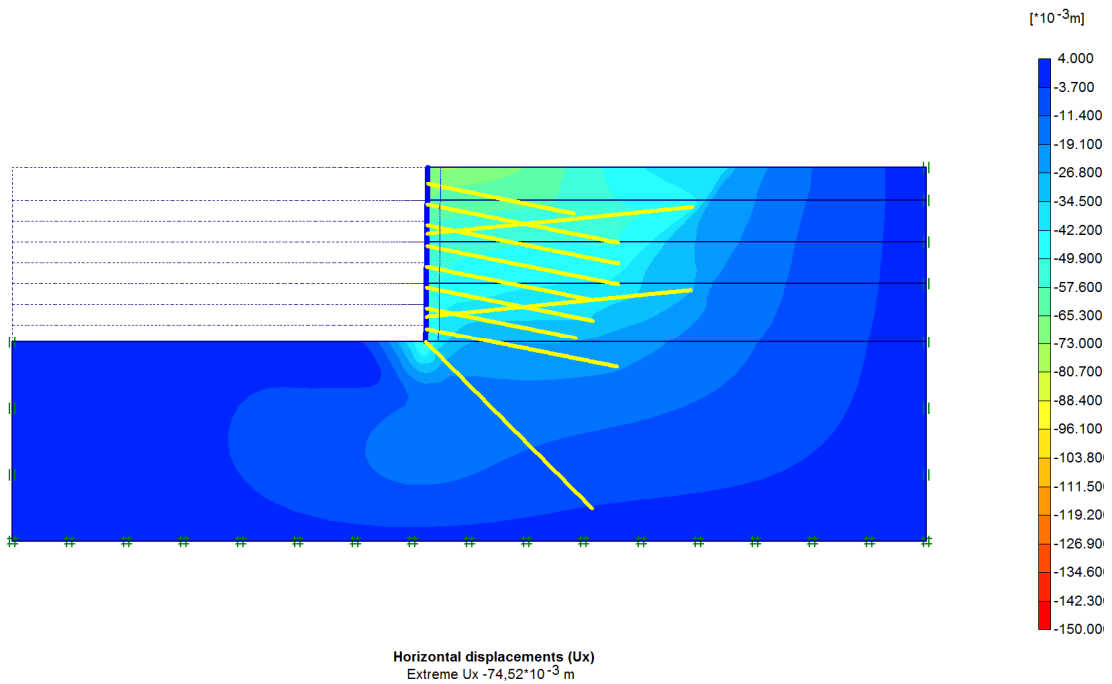


Figura 41: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada

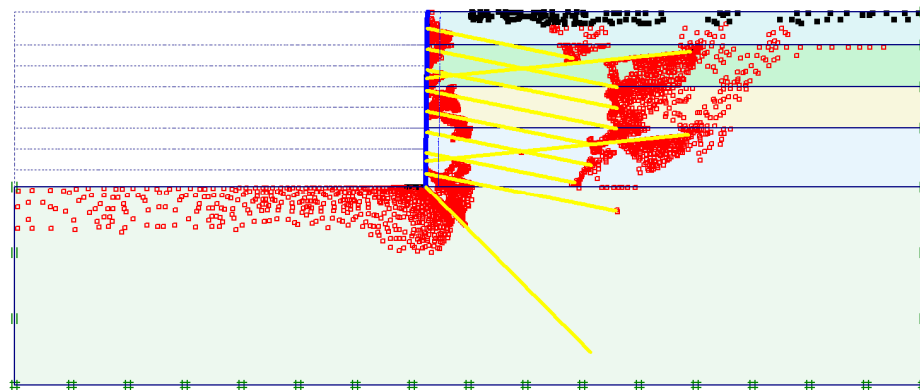


Figura 42: pontos de plastificação do SRGPA para a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada.

A figura 43 mostra a deformada da estrutura para a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços e correção de módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada, na última fase de escavação.



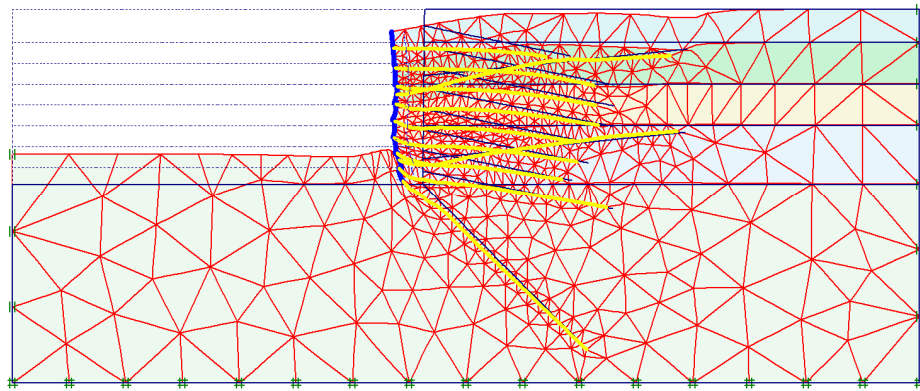


Figura 43: deformada da estrutura de solo grampeado para a análise elástica perfeita plástica IV com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada.

Para esta análise obtiveram-se deslocamentos horizontais da ordem de 2,1 cm no topo da escavação. A figura 44 mostra a distribuição dos deslocamentos. Também, na figura 45 apresentam-se os pontos onde o SRGPA passa do regime elástico para o regime perfeitamente plástico.

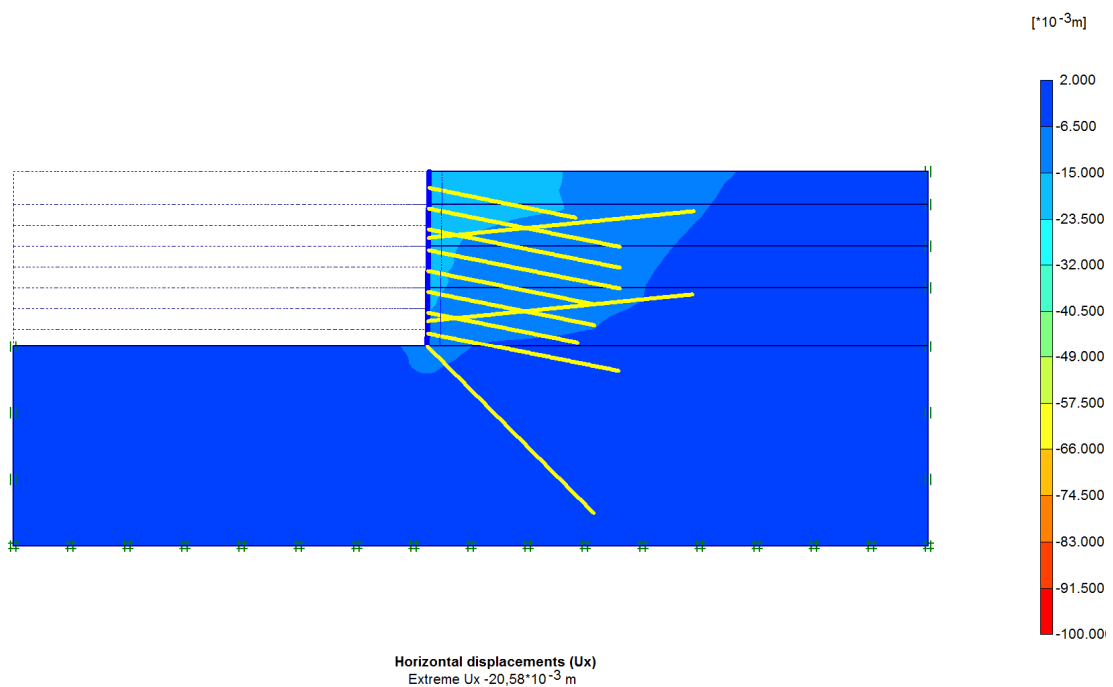


Figura 44: distribuição dos deslocamentos horizontais da parede com a profundidade para a análise elástica e perfeita plástica IV com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada.

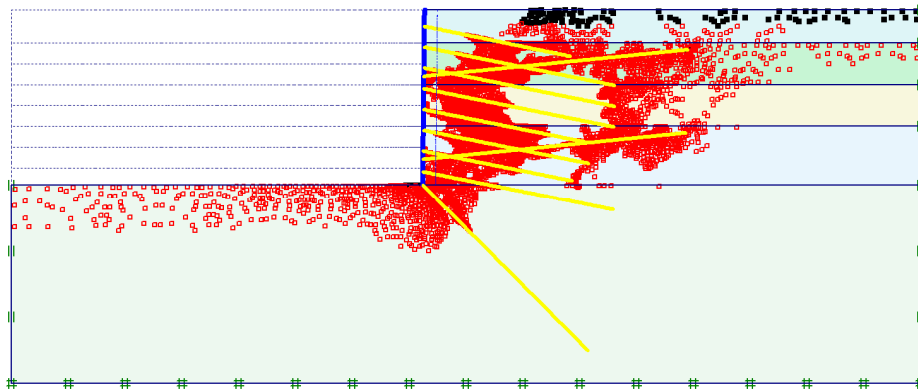


Figura 45: pontos de plastificação do SRGPA para a análise elástica e perfeitamente plástica IV com reforços e correção dos módulos de deformabilidade do SRGPA em função da deformação de cisalhamento mobilizada.

#### 8.4 ANÁLISE DAS CARGAS AXIAIS NOS GRAMPOS

Analisaram-se, também, as cargas axiais nos grampos através do programa PLAXIS. Como descrito anteriormente, estas cargas axiais são originadas das tensões de cisalhamento na interface entre grampo e solo que provem das deformações do maciço oriundas do desconfinamento lateral do SRGPA provocado pela execução da escavação.

O programa PLAXIS informa a carga axial no grampo como uma força distribuída ao longo do grampo (analisado como elemento contínuo do tipo geogrelha) e dada em kN/m (figura 46). Para que fosse possível uma comparação com os resultados dos ensaios de arrancamento de grampos fornecidos por Azambuja et al. (2003), a seguinte formulação foi utilizada:

$$T_{\max (\text{grampo})} = S_h T_{\max (\text{plaxis})} \quad (7)$$

$$\tau_g = T_{\max (\text{grampo})} / ((\pi \cdot d) \cdot L_a) \quad (8)$$

Onde:

$S_h$  = espaçamento horizontal entre grampos [m];

$T_{\max(\text{plaxis})}$  = força axial no grampo calculada pelo programa [kN/m];

$T_{\max(\text{grampo})}$  = força axial no grampo [kN];

$d$  = diâmetro do furo para instalação do grampo [m];

$L_a$  = comprimento de ancoragem do grampo [m];

$\tau_g$  = tensão de arrancamento (ancoragem) média do grampo.

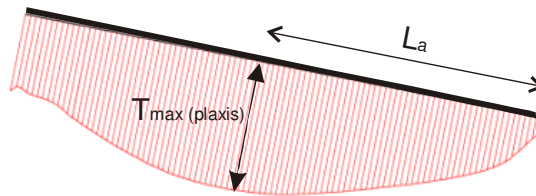


Figura 46: forma típica da distribuição de carga axial no grampo calculada pelo programa PLAXIS (considerado neste tipo de análise como elemento do tipo geogrelha)

Os valores de  $\tau_g$  calculados a partir dos resultados do programa PLAXIS podem ser vistos no quadro 16 onde foram feitos estes cálculos para as oito linhas de grampos, considerando as análises elásticas perfeitamente plásticas IC, IV, IC com reforços e IV com reforços. Para melhor visualização destes resultados, desenvolveu-se o gráfico apresentado na figura 47.

tensão de arrancamento					
$\tau_g$ do plaxis [kPa]					
grampo	cota	IC	IV	IC reforços	IV reforços
1	-1	41,94	41,23	35,15	38,68
2	-2,25	62,89	61,75	30,86	27,80
3	-3,5	34,07	22,12	49,57	10,58
4	-4,75	30,14	27,90	58,36	18,99
5	-6	36,73	32,00	36,69	32,90
6	-7,25	54,93	49,37	45,49	36,24
7	-8,5	68,08	63,18	38,17	35,38
8	-9,75	49,11	39,84	32,51	22,99

Quadro 16: resumo dos valores das tensões de arrancamento médias dos grampos,  $\tau_g$ , calculados a partir dos resultados das análises realizadas com o programa PLAXIS

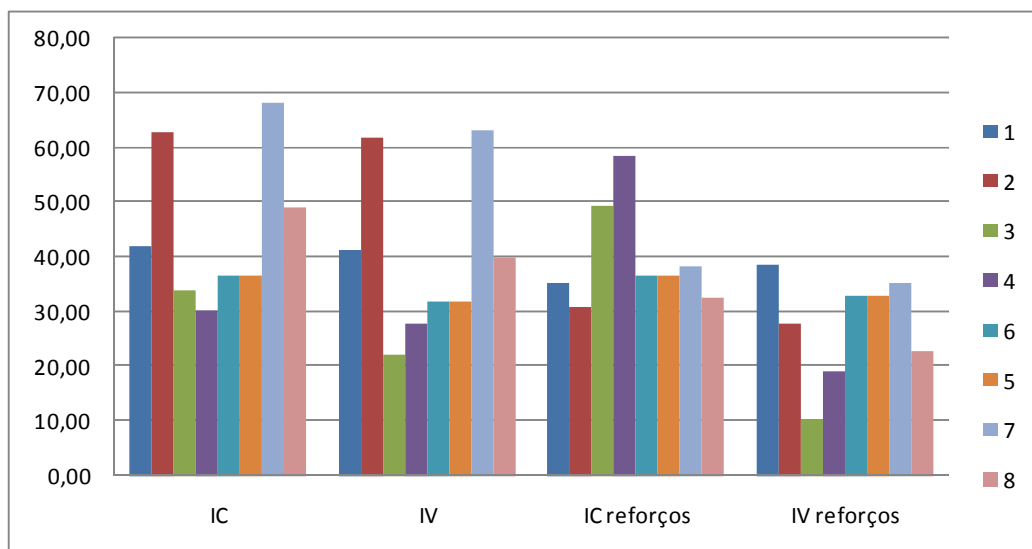


Figura 47: gráfico das tensões de arrancamento médias,  $\tau_g$ , em cada linha de grampo, calculadas a partir dos resultados das análises com o programa PLAXIS

Pode-se, também, avaliar a integridade dos grampos comparando os valores de  $T_{max}$  com a carga axial de trabalho ( $T_{trab}$ ) dos grampos utilizada no projeto da estrutura em solo grampeado na obra da Terceira Perimetral, onde  $T_{trab} = 240$  kN. Pode-se fazer a hipótese de que a área do grampo equivale somente à área de aço, pois, devido à baixa resistência característica à tração da nata de cimento ( $f_{ck} = 13,5$  kPa) e à sua fragilidade em relação ao comportamento mais dútil do aço, considera-se a nata como um material completamente fissurado e as propriedades de resistência à tração do grampo, para esta situação, podem ser descritas como sendo as propriedades da seção de aço (3 grampos de 20 mm de diâmetro). Os valores das cargas máximas ( $T_{max}$ ) e o comprimento de ancoragem ( $L_a$ ), encontrados nos grampos pelo programa PLAXIS, estão descritos no quadro 17.

grupo	Tmax [kN] e La [m]							
	IC		IV		IC reforços		IV reforços	
	Tmax	La	Tmax	La	Tmax	La	Tmax	La
1	45,40	3,45	43,19	3,33	42,95	3,89	40,51	3,33
2	72,62	3,68	64,88	3,34	47,91	4,94	45,02	5,15
3	62,67	5,86	54,94	7,90	27,53	1,77	35,82	10,77
4	81,78	8,64	75,71	8,64	43,09	2,35	55,49	9,30
5	68,25	5,91	76,54	7,61	70,64	6,13	85,30	8,25
6	130,07	7,54	125,50	8,09	119,68	8,37	90,14	7,92
7	135,54	6,34	125,78	6,34	56,77	4,73	66,08	5,95
8	142,49	9,23	112,75	9,01	90,83	8,89	64,24	8,89

Quadro 17: resumo dos valores da carga axial máxima de arrancamento dos grampos  $T_{max}$  e dos comprimentos de ancoragem  $L_a$ , ambos calculados a partir dos resultados das análises com o programa PLAXIS

## 9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As distribuições de valores de deslocamentos horizontais na frente de escavação apresentaram, em todas as análises realizadas com o programa PLAXIS, o padrão de comportamento esperado. Os maiores deslocamentos foram encontrados no topo da escavação, diminuindo com a profundidade. O solo desconfinado pela escavação mobiliza empuxo lateral procurando o estado de equilíbrio com os reforços. Quanto mais afastado da base de escavação em direção ao topo, maiores são as deformações no maciço. Também, pode-se afirmar que esta distribuição de deslocamentos horizontais é influenciada pelo aumento do módulo de deformabilidade do SRGPA com a profundidade.

Foi possível observar o comportamento das superfícies (pode-se chamar, neste caso, de regiões) potenciais de ruptura através da concentração dos pontos de plastificação observados nas análises com módulos IC e IV corrigidos com e sem reforços. Nas análises utilizando módulos IC, demonstram-se concentrações de elementos plastificados no final dos grampos (lado oposto a parede de concreto projetado), mostrando uma tendência de ruptura externa, como se o sistema estivesse funcionando como uma estrutura única (semelhante a um muro de gravidade). Porém, nas análises IV, onde os módulos de descarregamento do SRGPA tornam-se mais elevados, observa-se, uma tendência de ruptura interna que seccionam os grampos, além da tendência dos pontos de plastificação observados nas análises IC.

Observa-se o desenvolvimento de uma área maior de plastificação do SRGPA nos contatos com os grampos para a análise elástica perfeitamente plástica IV com módulos de deformabilidade do SRGPA corrigidos em função da deformação de cisalhamento mobilizada, em comparação com a análise IC, também com módulos corrigidos. Isto se deve ao fato da existência de uma maior rigidez na análise IV provocar um comportamento mais frágil na estrutura em solo grampeado.

Observam-se, em alguns casos, pontos de plastificação concentrados nos contatos entre camadas com rigidez diferentes. Este fato é proveniente da utilização do procedimento de discretização de camadas descrito em 7.1. Porém, não se tem a certeza de como estes pontos influenciam nas análises.

Saré (2007) descreve que o aumento da rigidez da estrutura em solos grampeados é possível através de soluções mistas, ou seja, mediante combinações de grampos com ancoragens

convencionais. Isto minimiza as deformações no solo e conseqüentemente os recalques. Esta solução é interessante quando existe grande densidade de prédios e estruturas vizinhas à obra em solo grampeado. Foi também este o tipo de solução mista adotada pelos projetistas da obra estudada neste trabalho. As análises numéricas realizadas com o programa PLAXIS demonstram que, de fato, as inclusões de reforços diminuem os deslocamentos horizontais da estrutura em solo grampeado da Terceira Perimetral. Isto pode ser observado na figura 48 comparando a magnitude dos valores de deslocamentos horizontais encontrados na análise elástica perfeitamente plástica IC com a análise elástica perfeitamente plástica IC com reforços (IC ref.). O mesmo comportamento é observado na análise elástica perfeitamente plástica IV ao ser comparado com a análise elástica perfeitamente plástica IV com reforços (IV ref.).

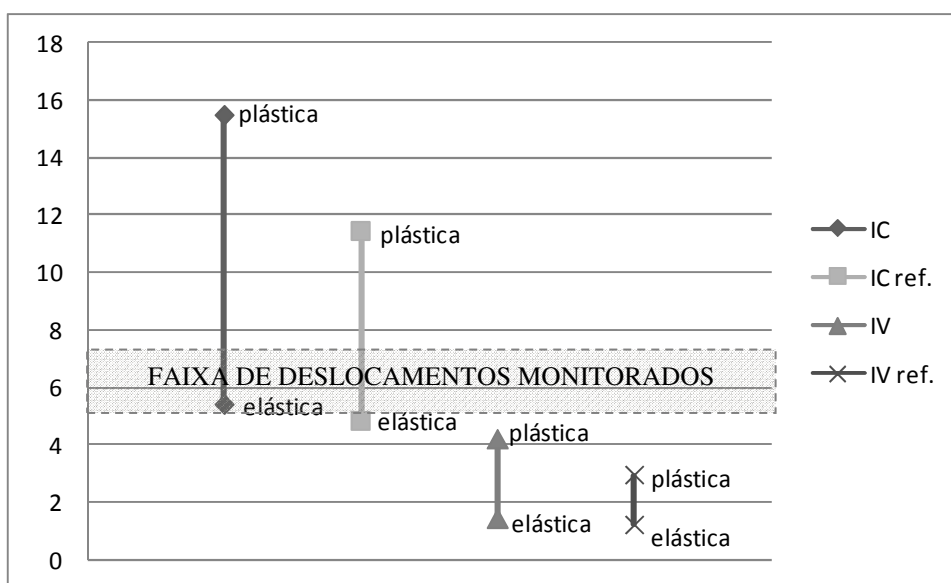


Figura 48: valores dos deslocamentos horizontais calculados pelas análises realizadas com o programa PLAXIS com os valores experimentais determinados pelo monitoramento da obra em solo grampeado da Terceira Perimetral (valores de deslocamentos expressos em cm)

Observa-se, na figura 48, que os deslocamentos horizontais calculados nas análises elásticas lineares e elásticas perfeitamente plásticas, utilizando os respectivos valores de módulos de descarregamento estimados para o SRGPA, encontram-se próximos à faixa de deslocamentos horizontais monitorados na estrutura em solo grampeado da Terceira Perimetral. Os maiores deslocamentos horizontais foram calculados pela análise elástica perfeitamente plástica IC sem reforços e os menores, para a análise elástica linear IV com reforços. Estes resultados

originam-se da variação dos módulos de descarregamento considerados neste trabalho, relativos aos módulos de carregamento obtidos por Gobbi (2005) por meio de ensaios triaxiais em amostras indeformadas do SRGPA. Isto decorre da existência de uma forte anisotropia de deformabilidade no SRGPA, pois dependendo da direção das tensões no interior deste solo o seu comportamento mecânico varia. No entanto, quando os resultados médios das diferentes análises são considerados, há boa concordância com os resultados experimentais obtidos do monitoramento da estrutura.

fator de segurança					
		qs de ensaio= 204 kPa		cota=4,0m	
grupo	cota	IC	IV	IC reforços	IV reforços
1	-1	4,86	4,95	5,80	5,27
2	-2,25	3,24	3,30	6,61	7,34
3	-3,5	5,99	9,22	4,12	19,28
4	-4,75	6,77	7,31	3,50	10,74
5	-6	5,55	6,38	5,56	6,20
6	-7,25	3,71	4,13	4,48	5,63
7	-8,5	3,00	3,23	5,34	5,77
8	-9,75	4,15	5,12	6,28	8,87

Quadro 18: fatores de segurança relativos  $FS = qs(\text{ensaio})/\tau_g(\text{plaxis})$

A introdução dos reforços adicionais aumentou o fator de segurança (FS) ao arrancamento dos grampos existentes, além de reduzir os deslocamentos horizontais previstos pelas análises com o programa PLAXIS para a estrutura em solo grampeado, com referência aos resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos (AZAMBUJA et al., 2005) realizados durante a execução da obra (para os quais se obteve  $qs(\text{ensaio}) = 204$  kPa). Isto pode ser visto no quadro 18, onde se apresentam os fatores de segurança reais relativos a resistência média do contato entre solo e grampo,  $FS = qs(\text{ensaio})/\tau_g(\text{plaxis})$ , do sistema em solo grampeado estudado.

Sequencialmente pode-se obter os fatores de segurança real a ruptura por tração dos grampos quando se comparou a carga axial máxima de cada grampo, e para cada análise, encontrada no programa PLAXIS, com a carga de trabalho  $T_{\text{trab}}$  (240 kN) dos grampos executados na obra. O quadro 19 apresenta estes valores.

		fator de segurança			
		T <sub>trab</sub> = 240		kN	
grupo	cota	IC	IV	IC reforços	IV reforços
1	-1	5,29	5,56	5,59	5,92
2	-2,25	3,30	3,70	5,01	5,33
3	-3,5	3,83	4,37	8,72	6,70
4	-4,75	2,93	3,17	5,57	4,33
5	-6	3,52	3,14	3,40	2,81
6	-7,25	1,85	1,91	2,01	2,66
7	-8,5	1,77	1,91	4,23	3,63
8	-9,75	1,68	2,13	2,64	3,74

Quadro 19: fatores de segurança relativos a tração no grupo FS =  $T_{trab}/T_{max}$ (plaxis)

Um aumento da profundidade provoca um aumento da resistência ao cisalhamento atuante no contato do grampo com o solo. Isto é esperado, devido à existência de crescente valor da tensão de confinamento com a profundidade do solo analisado quando se tem os mesmos parâmetros de resistência ao cisalhamento ao longo da profundidade. Porém, observando os valores das tensões de arrancamento de grampos, encontrados nos grampos protótipos ensaiados durante as escavações da obra (figura 6), verificou-se que não há uma tendência claramente definida de valores crescentes da resistência média ao arrancamento com a profundidade. A figura 49 ilustra a relativa dispersão dos valores destes ensaios.

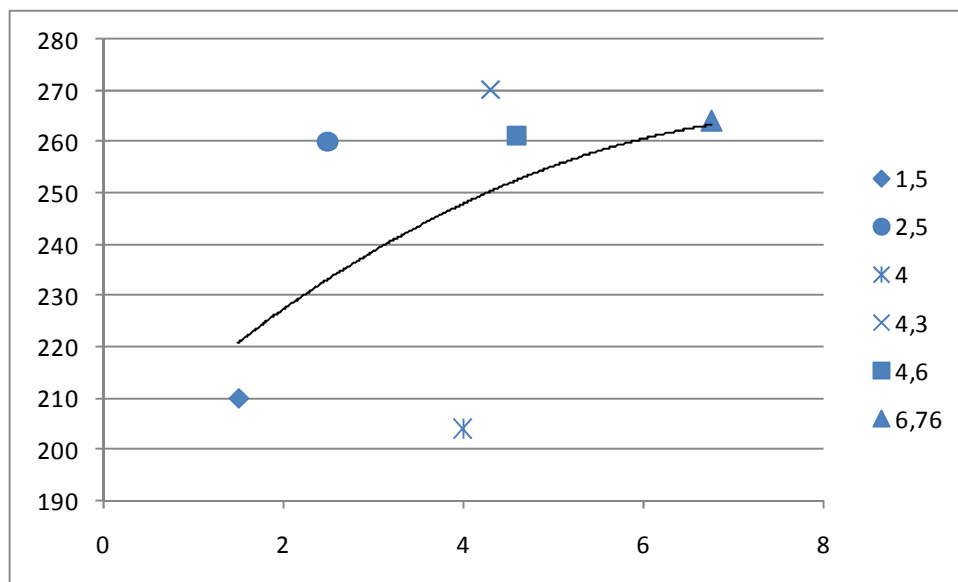


Figura 49: valores de resistência ao arrancamento  $q_s$  (kPa), determinados nos ensaios de arrancamento de grampos protótipos, em função da profundidade (m).



Os limites das bacias de deformação, ou seja, onde os deslocamentos verticais (adensamentos) do terreno se tornam nulos são medidos através da distância horizontal a partir do topo da escavação. Estes valores aproximados estão descritos, para as análises elásticas perfeitamente plásticas no quadro 20. As análises lineares elásticas não foram avaliadas, pois algumas apresentaram comportamento incoerente com a realidade.

limite da bacia de deformação		
comprimento em m		
módulos	análise	comprimento
não corrigido	IC	19,60
	IV	19,60
	IC reforços	23,60
	IV reforços	22,70
corrigido	IC	20,30
	IV	20,30
	IC reforços	22,50
	IV reforços	22,50

Quadro 20: comprimento das bacias de deformações para as diferentes análises

## 10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados das análises numéricas foram compatíveis com os dados de monitoramento da estrutura de solo grampeado. Os deslocamentos no topo da escavação, verificados nestas análises e considerando (i) a instalação de reforços e (ii) módulos de deformabilidade com valores entre as análises IC e IV, estão dentro da gama de valores medidos em campo. A utilização dos reforços descritos foi de fato executada em campo para a seção analisada. Sendo assim, os modelos considerados nestas análises foram válidos, mesmo levando em consideração as hipóteses simplificadoras e as limitações observadas durante a realização destas análises, como, por exemplo: a adaptação de elementos de reforços e demais parâmetros tridimensionais para possibilitar análises numéricas bidimensionais, além de outras descritas neste trabalho.

As tensões de cisalhamento no contato solo-grampo calculadas pelas análises numéricas apresentaram valores inferiores aos valores limites obtidos por Azambuja et al. (2003) nos ensaios de arrancamento de grampos. Os fatores de segurança ao arrancamento mostraram-se maiores que 3. Isto comprova a integridade da estrutura em solo grampeado que está em plena utilização.

Observou-se, também, que os valores das cargas axiais máximas nos grampos, determinadas pelas diversas análises realizadas com o programa PLAXIS, são inferiores à carga de trabalho do grampo ( $T_{\text{trab}} = 240 \text{ kN}$ ) considerada no projeto da estrutura em solo grampeado da Terceira Perimetral. Apresentando o valor mínimo de 1,68 (tabela 19) na análise IC sem reforços para o fator de segurança real. Isto confirma, também, a integridade deste sistema, onde as próprias cargas de trabalho dos grampos já assumem fatores de segurança intrínsecos.

As análises com reforços apresentam extensão das bacias de deformação maiores. Isto demonstra que apesar da redução dos módulos dos deslocamentos quando se executa os reforços, estes, ampliam a área de influência das deformações no interior do solo.

Apesar de que, neste trabalho, não se deteve na observação de deslocamentos verticais obtidos pelas análises no programa PLAXIS, observam-se, nas análises com correção de módulos, que existem grandes concentrações de pontos de plastificação no fundo da escavação.

Apresentando uma tendência de ruptura de fundo. De fato, isto foi observado em campo pelos projetistas, porém não se obteve nenhum tipo de monitoramento destes deslocamentos. Uma comprovação deste fato é a presença do reforço orientado a 45° e inserido no pé da escavação de fato executado (ver análises com reforços).

O SRGPA apresenta um comportamento mecânico bastante complexo. A anisotropia deste solo é muito marcante. Dependendo das direções das tensões principais, este solo pode ser menos ou mais rígido. A rigidez do SRGPA foi expressa neste trabalho através do parâmetro módulo de deformabilidade. A magnitude das deformações do maciço está diretamente ligada à orientação do bandamento de sua microestrutura em relação ao plano de cisalhamento imposto. Portanto, deve-se tomar bastante cautela na execução de obras em materiais deste tipo, pois, para que se tenha conhecimento mais completo do comportamento geomecânico, estas exigem maiores investigações geotécnicas, incluindo ensaios de laboratório especiais e retroanálises de rupturas induzidas. Porém, o sistema em solo grampeado tem a vantagem de permitir rápidas intervenções no projeto à medida que ocorre seu processo executivo descendente, qualificando este sistema nestas condições.

Para um próximo trabalho podem-se realizar análises numéricas utilizando outros programas computacionais, principalmente aqueles que envolvam análises nas três dimensões da estrutura. Também, pode ser interessante utilizar outros modelos constitutivos do solo ou ainda outros métodos de cálculo, como por exemplo, o Método das Diferenças Finitas.

Outra avaliação possível seria a comparação dos fatores de segurança globais encontrados pelos métodos de equilíbrio limite no projeto da obra da Terceira Perimetral com os fatores de segurança globais calculados pelo programa PLAXIS, que são relativos a fatores de segurança parciais aplicados sobre a forma de reduções dos parâmetros geotécnicos.

As tensões não dissipadas ao longo do grampo que carregam o faceamento de concreto projetado também podem ser avaliadas em trabalhos futuros. Pois, uma avaliação de integridade estrutural do faceamento poderia ser realizada com um levantamento de medições de trincas e fissuras presentes na obra atualmente.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de Estrutura de Concreto**: Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682 – Estabilidade de Encostas**: Projeto. Rio de Janeiro. 2006.

AZAMBUJA, E., STRAUSS, M., SILVEIRA, F. G. Sistema de contenção em solo grampeado na cidade de Porto Alegre. In: WORKSHOP SOBRE SOLO GRAMPEADO, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS; Sinduscon/SP, 2003, p. 21-34.

BERNARDES, J. A. **Investigação sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual de gnaiss**. 2003. n f. 134. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CLOUTERRE. **Recommendations Clouterre – Soil Nailing Recommendations for Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing (English Translation)**, Scientific Committee of the French National Project Clouterre, ENPC, Paris, France. In: Report FHWA-SA-93-026, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 1991, July. Edited by F. Schlosser.

GERCOVICH, D. M. S.; SIEIRA, A. C. C. F.; LIMA, A. P.; SAYÃO, A. S. F. J., **Técnica de modelagem numérica de escavações de taludes em solo grampeado**. In: IV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2005, Bahia. **Anais...** Salvador: ABMS; Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 2005, v. 2, p. 643-655.

GOBBI, F. **Investigação do comportamento mecânico de um solo residual de gnaiss da cidade de Porto Alegre**. 2005. n f. 159 Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HACHICH, W. C.; CAMARGO, V.E.L.B. **Comparação de processos de dimensionamento de estruturas em solo grampeado**. In: WORKSHOP SOBRE SOLO GRAMPEADO, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS; Sinduscon/SP, 2003, p. 179-185.

HENRIQUES, P. R. D. J. **Simulação numérica de ensaios de arrancamento de grampos**. 2007. n f. 241. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro.

LAZART, C. A., ELIAS, V., ESPINOZA, R. D., SABATINI, P. J. **Soil nail walls**. Report FHWA0-IF-03-017, Geotechnical Engineering Circular n. 7, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 2006, March.

LOZANO, M. H.; PAIAS, C. **Solo Grampeado**. Como Construir: Técnica, São Paulo, n. 116, nov. 2006. Mensal. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/116/artigo35397-1.asp>>. Acesso em: 01 jun. 2009.

PLAXIS BV DELFT, **Manuel de référence**. Netherlands, 2003. Disponível em: <<http://www.plaxis.nl>>. Acesso em: 20 mai. 2008.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. Tradução de Rualdo Menegat. 4 ed. Porto Alegre: Boman, 2006.

SARÉ, A. R. **Comportamento de escavações grampeadas instrumentadas em solo residual**. 2007. n f. 304 Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

ZIRLIS, A. C., PITTA, C. A. **Chumbadores injetados: a qualidade do solo grampeado**. In: Anais do 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia (SEFE), v. 2, pp. 541-547, São Paulo (SP), Julho, 2000.