



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia


Jéssica Pontes Seabra

Análise Numérica de uma Escavação Grampeada

Rio de Janeiro
2015

Jéssica Pontes Seabra

Análise Numérica de uma Escavação Grampeada



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Ana Cristina Castro F. Sieira
Prof. Dr. André Pereira Lima

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S438 Seabra, Jéssica Pontes.
Análise numérica de uma escavação grampeada / Jéssica
Pontes Seabra – 2015.
105f.

Orientador: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira.
Coorientador: André Pereira Lima.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Taludes (Mecânica do solo) -
Dissertações. 3. Solo - Drenagem - Dissertações. 4. Escavação
- Dissertações. 5. Estruturas de contenção - Dissertações. I.
Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. II. Lima, André Pereira. III.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624:519.62

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Jéssica Pontes Seabra

Análise Numérica de uma Escavação Grampeada

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 01 de Outubro de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ana Cristina Sieira (Orientador)
de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. André Pereira Lima (Coorientador)
Faculdade de Engenharia – UVA

Prof. Dr. Rogério Luiz Feijó
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Michéle Dal Toé Casagrande
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2015

DEDICATÓRIA

É na educação dos filhos
que se revelam as virtudes dos pais.

Coelho Neto

Aos meus pais, Norma e Amarelho, que apesar de tudo, de todas as dificuldades e de todos os contratempos, sempre me incentivaram e despertaram em mim o interesse pelos estudos. O incentivo e apoio foram fundamentais para que eu me transformasse no que eu sou hoje e visse o mundo com um olhar diferente.

Aos meus guerreiros de coração grande.

AGRADECIMENTOS

Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre gigantes.

Isaac Newton

E é por isso que agradeço a Deus, pela proteção, pela sabedoria, pela saúde e pelas conquistas alcançadas nesses anos.

Aos meus pais, Norma e Amarilho, por terem me dado a vida e ensinado a vivê-la com dignidade, pelo todo incentivo, apoio, carinho, por todo esforço que fizeram para que eu concluísse mais uma etapa importante da minha vida.

Aos meus irmãos, Marco, Patricia e Jenifer, por todo apoio, carinho, brincadeiras e por sempre terem confiado em mim.

Ao meu namorado, Guilherme, por estar sempre presente, pelo carinho, incentivo e paciência. Pelos momentos descontraídos onde conseguia me acalmar, pelo apoio e incentivo para o meu crescimento profissional. Por entender a minha ausência em alguns momentos.

À minha orientadora, Professora Ana Cristina, pelos conhecimentos transmitidos, pela dedicação na orientação no trabalho, pelo incentivo e confiança, além das risadas nos momentos finais que conseguiam aliviar um pouco a ansiedade e nervosismo.

Ao meu coorientador, Professor André Lima, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos professores da graduação, Bernadete, Feijó, Alessandra, Maurício, Denise e Ana Cristina (novamente) pelos ensinamentos dados em sala de aula que fizeram despertar o interesse pela área geotécnica.

Aos meus colegas de PMP, em especial Ricardo, José Eduardo, Nilton, Nettinho, Adriana, Leda e Flávia, pelo apoio, incentivo e paciência com os meus estudos.

Aos amigos de mestrado, Cynthia, Edwiges, Luizimar, Leonardo, Amanda, Stephane, Raphael, Daniele, Marcelle e Fernandinha, pelo incentivo, ajuda e apoio nas diferentes etapas desta jornada.

Aos meus sobrinhos, Paloma, Matheus, Marcos Vinicius, Ana Carolina e João Victor, pelos momentos de descontração e brincadeiras. Aos meus cunhados, pelo apoio.

Agradeço a todos os familiares e amigos pelos momentos alegres, pelo incentivo, companheirismo e carinho, que embora não citados nominalmente, contribuíram para a execução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida,
a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força,
muita determinação e sempre faça tudo com muito amor
e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá.
De alguma maneira você chega lá.

Na adversidade, uns desistem, enquanto outros batem recordes.

Ayrton Senna

RESUMO

SEABRA, Jéssica Pontes. *Análise numérica de uma escavação grampeada*. 2015. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A técnica em solo grampeado vem sendo cada vez mais utilizada em obras de estabilização de taludes. O uso de sistemas computacionais em projetos de obras de reforço de solo por grampeamento vem se tornando cada vez mais presentes na geotecnia. Ainda assim, não existe uma norma brasileira para direcionar melhor a execução deste tipo de estabilização. Este trabalho apresenta um estudo de caso de uma obra instrumentada no Japão onde a escavação de 13,50 metros de altura procedeu-se sobre um solo residual granítico. Foi realizada calibração deste modelo através do Programa PLAXIS, para validação do software e posteriores análises. Os resultados dos estudos mostraram o quanto eficiente e simples pode ser a adoção do Plaxis como ferramenta de apoio em estruturas de solo grampeado. As análises posteriores à calibração foram baseadas em alguns parâmetros que podem influenciar na magnitude dos deslocamentos horizontais máximos da estrutura. Ainda há uma hesitação dos pesquisadores/ executores desta técnica sobre a espessura ideal do paramento, que garanta estabilidade local e ainda proporcione rapidez na obra e diminuição dos custos. Em função disto, foram realizadas análises sobre diferentes espessuras adotadas no revestimento da face e a avaliação da sua influência na magnitude dos deslocamentos horizontais máximos. Foi possível também realizar a análise dos esforços máximos nos grampos através da modelagem e comparar os resultados com os dados fornecidos na instrumentação. Também foi realizada uma comparação entre diferentes processos executivos e a sua influência nos valores de deslocamentos máximos. A análise dos resultados possibilitou confirmar a capacidade e utilidade do programa Plaxis no desenvolvimento e elaboração de projetos de solo grampeado além de ter uma compreensão melhor sobre os fatores que influenciam na magnitude dos deslocamentos horizontais da estrutura.

Palavras-chave: Estabilização de taludes; Solo Grampeado; Chumbadores; Concreto projetado; Drenagem; Revestimento da face; Deslocamentos Horizontais

ABSTRACT

SEABRA, Jéssica Pontes. *Numerical analysis of a soil nailed excavation*. 2015. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The soil nailing technique is being increasingly used in slope stabilization works. The use of computer systems in soil reinforcement projects with nailing is becoming increasingly present in the offices. Still, there is no Brazilian standard to better target the implementation of this type of stabilization. This paper presents a case study of an instrumented work in Japan where the excavation of 13.50 meters proceeded on a granitic residual soil. Calibration of the model was performed using the Plaxis program for software validation and further analysis. The results of the studies showed how efficient and simple can be the adoption of Plaxis as a support tool for nailed soil structures. Further analyses to the calibration were based on some parameters that can influence the magnitude of the maximum horizontal displacements of the structure. There is still a hesitancy of researchers / performers of this technique over the ideal thickness of the vestment, ensuring local stability, providing speed in work and also lowering costs. For this reasons, tests were carried out on different face coating thicknesses and the assessment of their influence on the magnitude of the maximum horizontal displacements. It was also possible in this research to carry out an analysis of maximum efforts in the nails by modeling and later comparing the results with the data provided in the instrumentation. It was also performed a comparison between different execution processes and their influence on the maximum displacement values. The results made possible to confirm the capacity and utility of Plaxis program on the development and preparation of nailed soil projects, in addition to having a better understanding of the factors that influence the magnitude of the horizontal displacement of the structure.

Keywords: Slope Stabilization; Soil Nailing; Nail; Shotcrete; Straining; Face Coating; Horizontal Displacement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação esquemática entre os métodos convencional e NATM	21
Figura 2 – Solo grampeado em combinação com contrafortes ancorados – Nova Subida da Serra Petrópolis (<i>arquivo pessoal - 2015</i>).....	23
Figura 3 – Linha Amarela – (<i>arquivo pessoal 2015</i>).....	23
Figura 4 – Nova subida da Serra de Petrópolis (<i>arquivo pessoal – 2015</i>) – Emboque do túnel escavado e ao lado, talude natural.....	24
Figura 5 – Processo de escavação em bermas de equilíbrio (Lazarte et. al, 2003) .	26
Figura 6 – Processo de escavação em bermas, execução de solo grampeado (www.proenggeotecnia.com.br/solophp , 15/07/2015, 15:47)	26
Figura 7 – Detalhe de algumas perfuratrizes utilizadas para execução do furo	27
Figura 8 – Perfuração para execução de solo grampeado. Obra: Duplicação da Serra do Cafezal, Rodovia Regis Bittencourt, km 353	28
Figura 9 – Fixação dos grampos injetados na face do concreto: (a) Barras com diâmetros maiores do que 20 mm e (b) barras menores do que 20 mm.....	29
Figura 10 – Detalhe do grampo injetado (http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/20/artigo271666-1.aspx , 27/08/2015,16:25).....	30
Figura 11 – Detalhe dos equipamentos de injeção: Bomba Injetora e Misturador Helicoidal (www.rudloff.com.br/concreto-protendidocatalogo-tela.php , 17/08/2015, 15:34)	32
Figura 12 - Solo grampeado com revestimento vegetal – Praça do Pedágio – subida Petrópolis (<i>arquivo pessoal 2015</i>).....	33
Figura 13 - Concreto Projetado sobre tela metálica - combinação de talude natural e escavado – Desemboque do novo túnel da nova subida de Petrópolis	33
Figura 14 - Detalhe do dreno linear contínuo e tipo barbacã (Zirlis et.al. 1999)	35
Figura 15 – Face em concreto projetado (<i>arquivo pessoal 2015</i>).....	46
Figura 16 – Execução do concreto projetado	47
Figura 17 – Comparação de dois métodos de pré-umidificação da via seca: CPJET x BOOSTER.....	49
Figura 18 – Detalhe da armação – Concreto Projetado	50
Figura 19 – Detalhe das fibras metálicas misturadas no concreto	50

Figura 20 – Aplicação: concreto projetado com fibra metálica (www.neomutex.com.brconcreto-fibras-polipropileno, 17/08/2015, 17:24).....	51
Figura 21 – Comparação: tela metálica x fibras metálicas	51
Figura 22 – Fibras de polipropileno	52
Figura 23 – Geomanta reforçada com malha de aço de dupla torção.....	53
Figura 24 – Instalação da geomanta no talude em Angra dos Reis (Maccaferri, 2011)	53
Figura 25 – Final da obra em Angra dos Reis (Maccaferri, 2011) – Revestimento vegetal.....	54
Figura 26 – Face com revestimento vegetal – Revista técnhe	54
Figura 27 – Revestimento com tela TECCO de alta resistência – Geobrugg (http://www.geobrugg.com, 17/07/2015, 18:47).....	55
Figura 28 – Posicionamento dos blocos e detalhes do alinhamento e do nivelamento	56
Figura 29 – Concretagem e solidarização do grampo no paramento	57
Figura 30 – Solo grampeado em Araras, Petrópolis.....	57
Figura 31 – Detalhes da Estabilização do Ed. Astor (Souza et al, 2007)	59
Figura 32 – Término da construção do Ed Astor (Souza et al, 2007)	60
Figura 33 – Detalhes do novo projeto ao lado da construção do Ed Castor.....	61
Figura 34 – Detalhes da escavação dos grampos da construção do Ed. Astor.....	62
Figura 35 – Vista do término da execução da nova estabilização em solo grampeado	62
Figura 36 – Seção crítica: solo grampeado Hong Kong (Wong et al, 1997)	66
Figura 37 – Posicionamento do inclinômetro (Wong et al, 1997)	67
Figura 38 – Geometria adotada.....	68
Figura 39 – Condição Inicial	70
Figura 40 – 1ª Fase de execução.....	72
Figura 41 – 2ª Fase de execução.....	73
Figura 42 – 3ª Fase de execução.....	74
Figura 43 – 4ª Fase de execução.....	74
Figura 44 – 5ª Fase de execução.....	74
Figura 45 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 01.....	76
Figura 46 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 02.....	77
Figura 47 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 03.....	77

Figura 48 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 04.....	78
Figura 49 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 05.....	78
Figura 50 – Vetores de deslocamentos horizontais: Final da escavação	79
Figura 51 – Extensometria dos grampos 03 e 07 em diferentes fases de execução	80
Figura 52 – Obtenção dos esforços no Plaxis	81
Figura 53 – Distribuição da força normalizada: Plaxis x Extensometria	83
Figura 54 – Alternativa 1 para representação da face.....	84
Figura 55 – Alternativa 2 para representação da face.....	84
Figura 56 – Comparação entre os diferentes tipos de representação da face	85
Figura 57 – Deslocamentos horizontais previstos: paredes com diferentes espessuras	86
Figura 58 – Deslocamentos horizontais previstos: paredes com espessuras < 10 cm	87
Figura 59 – Influência do Processo Executivo.....	90
Figura 60 – Escavação mecânica para execução de solo grampeado, Niterói - RJ.	91
Figura 61 – Influência da velocidade de escavação – Processo Executivo 3: Dh _{máx} = 10,1 mm e Processo com 2 linhas de escavação: Dh _{máx} = 10,8 mm.	93
Figura 62 – Detalhe do elemento <i>fixed-end anchor</i> para representação do travamento dos grampos realizado por placas e porcas	94
Figura 63 – Influência do travamento do grampo	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas especificações de Projeto para grampos injetados (Ortigão, 1997)	30
Tabela 2 – Número de Grampos a serem ensaiados (Clouterre,1991)	44
Tabela 2 – Parâmetros Geotécnicos adotados nas análises	69
Tabela 3 – Parâmetros do grampo	69
Tabela 4 – Parâmetros adotados na simulação da face	70
Tabela 5 – Etapas de Cálculo	71
Tabela 6 – Deslocamentos horizontais máximos previstos e medidos	79
Tabela 7 – Esforços máximos obtidos no Plaxis	80
Tabela 8 – Esforços máximos previstos numericamente ao final da escavação	82
Tabela 9 – Parâmetros adotados para obtenção da força normalizada.....	82
Tabela 10 – Deslocamentos máximos previstos para diferentes espessuras da face	87
Tabela 11 – Descrição dos processos executivos	89
Tabela 12 – Comparação entre 2 processos executivos	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FLAC	<i>Fast Lagrangian Analysis of Continua</i>
PLAXIS	<i>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</i>
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área do grampo
D	diâmetro do grampo
E	módulo de deformabilidade
γ	peso específico
γ_{sat}	peso específico saturado
γ_d	peso específico seco
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
c'	coesão efetiva
k_x	permeabilidade horizontal
k_y	permeabilidade vertical
ν	Coefficiente de Poisson
I	Momento de Inercia
Dh	Deslocamento horizontal
T_{max}	Esforço máximo no grampo
H	Altura de escavação
F _n	Força normalizada
R	Fator de redução na interface
ϕ'_{inter}	ângulo de atrito efetivo na interface
c'_{inter}	coesão efetiva na interface
S_v	espaçamento vertical
S_h	espaçamento horizontal
Z	Profundidade

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
Motivação	18
Objetivos.....	18
Estrutura da dissertação	19
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.1. Processo Executivo	24
1.1.1. Escavação	25
1.1.2. Perfuração	27
1.1.3. Injeção	28
1.1.4. Revestimento da face	32
1.1.5. Drenagem	34
1.2. Vantagens e desvantagens da técnica de solo grampeado	36
1.3. Comportamento mecânico do solo grampeado	38
1.3.1. Resistência ao Arrancamento (qs).....	41
1.3.2. Descrição do Ensaio de Arrancamento	42
1.3.3. Resistência à tração	44
1.3.4. Resistência aos esforços cisalhantes e momentos fletores.....	45
1.4. Tipos de Paramento – Revestimento da face	45
1.4.1. Concreto Projetado	46
1.4.1. Revestimento Vegetal.....	52
1.4.2. Blocos Pré-moldados de concreto	55
1.5. Casos de Obra	58
1.5.1. Caso do Edifício Astor (Souza et al, 2007)	58
2. ANÁLISES NUMÉRICAS	63
2.1. Introdução.....	63
2.2. Programa Plaxis	63
2.3. Caso Analisado.....	65
2.4. Metodologia Adotada	68
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
3.1. Reprodução do processo executivo.....	75
3.2. Influência da espessura do paramento	83

3.3.	Influência do processo executivo	88
3.3.1.	Influência da velocidade de escavação	91
3.4.	Influência do travamento do grampo	93
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
4.1.	Conclusões	96
4.2.	Trabalhos futuros	97
	REFERÊNCIAS	98

INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas de reforço de solos para a estabilização de taludes naturais e escavações apresenta-se em crescimento em todo o mundo. A técnica do solo grampeado tem cada vez mais aceitação no âmbito da engenharia geotécnica brasileira, principalmente pela sua versatilidade em se adaptar a geometrias variadas, baixo custo e alta velocidade de execução.

A técnica do solo grampeado pode ser definida como o resultado da introdução de chumbadores, barras de aço envolvidas por calda de cimento, em uma escavação de um maciço natural ou do próprio talude, em conjunto com um revestimento superficial, que pode variar, sendo de concreto projetado, tela metálica ou apenas proteção vegetal (“solo grampeado verde”). Com a utilização desta solução de estabilização, que pode ser temporária ou permanente, busca-se a restrição dos deslocamentos e a transferência dos esforços de uma zona potencialmente instável para uma zona resistente. Este tipo de obra é frequentemente aplicada para a estabilização de taludes instáveis ou rompidos, emboques de túneis, escavação de subsolos, inclusive em centros urbanos, etc.

O processo construtivo é realizado em etapas sucessivas e descendentes, envolvendo, tipicamente, quatro fases principais e repetitivas: escavação com altura limitada; execução dos chumbadores; construção da face com concreto projetado e implantação de um adequado sistema de drenagem.

A solução de solo grampeado apresenta algumas vantagens em relação às técnicas similares de reforço normalmente utilizadas, entre as quais pode-se mencionar:

- **Baixo custo:** nesta técnica, o único elemento estrutural utilizado para a estabilização são os chumbadores. A proteção do escavação/talude, seja em concreto projetado ou outro tipo de estrutura, tem custo relativamente baixo em relação às soluções tradicionais;
- **Equipamentos leves:** os equipamentos utilizados nas diferentes etapas de execução (perfuração, injeção de calda de cimento e lançamento de concreto projetado) são leves e de fácil manuseio;

- **Velocidade de execução:** as técnicas utilizadas na execução do solo grampeado permitem uma boa produção. O tempo de execução é, em geral, muito menor, se comparado às soluções tradicionais;
- **Flexibilidade:** permite grande adaptação do projeto possibilitando eventuais ajustes durante a execução da obra, como a variação das condições geométricas do talude, inclinação da face, distribuição e dimensionamento dos chumbadores nos diferentes estágios de construção.

Motivação

No atual estado do desenvolvimento da engenharia geotécnica, procuram-se obter projetos que atendam às necessidades do local, mas também, que proporcionem menores custos. Os pesquisadores vêm buscando técnicas mais eficientes, que consigam atender e solucionar o problema de estabilidade mas que consigam realizá-lo com rapidez e custos menores. Por isso, a técnica em solo grampeado vem sendo cada vez mais utilizada em obras de estabilização de taludes. O uso de sistemas computacionais em projetos de obras de reforço de solo por grampeamento vem se tornando cada vez mais presentes na geotecnia. Ainda assim, não existe uma norma brasileira para direcionar melhor a execução deste tipo de estabilização

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento tensão-deformação de um talude de solo grampeado instrumentado, confrontando-se os resultados previstos numericamente com os fornecidos pelos instrumentos de medida (inclinômetros e extensômetros).

Após a calibração do modelo, é realizada uma avaliação da influência da espessura da face nas deformações do talude, de forma a propor uma espessura ótima avaliando a influencia da magnitude dos deslocamentos horizontais máximos observados. Também foi realizada uma comparação entre diferentes processos executivos e a influência destas variações nos valores dos deslocamentos máximos. Foi possível também realizar a análise dos esforços máximos nos grampos através

da modelagem e comparar os resultados com os dados fornecidos na instrumentação.

Estrutura da dissertação

O presente Capítulo apresentou a introdução da técnica estudada e os objetivos da presente pesquisa.

No Capítulo 2, são apresentados alguns estudos de caso realizados ao longo dos anos sobre a técnica do solo grampeado, além de uma breve revisão bibliográfica sobre esta técnica de estabilização.

No Capítulo 3, são apresentadas as características e descrição do caso analisado e uma breve descrição do programa computacional adotado nas análises numéricas.

O Capítulo 4 apresenta a validação do programa, a partir da reprodução de um caso de obra instrumentado, e discute a influência de fatores como: espessura da face, velocidade de escavação, travamento da face, e processo executivo na deformabilidade da escavação.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma sucinta revisão bibliográfica sobre a técnica de solo grampeado, além de resumos de trabalhos realizados ao longo dos anos sobre esta técnica, ilustrando o desenvolvimento e a realização de temas para projetos baseados na execução de solo grampeado.

A técnica de solo grampeado, originalmente chamada de “*Soil Nailing*”, vem sendo empregada em vários países. Em 1945, o Professor Landislau Von Rabcewicz desenvolveu uma técnica para avanço de escavações em túneis rochosos (Mitchell e Villet, 1987). A partir deste procedimento, originou-se a técnica de reforço de solos através de grampos. Após a execução da técnica em rochas, novos experimentos foram realizados em locais com menores resistência, como rochas alteradas e posteriormente em solos. Desde então, esta técnica antes chamada de NATM (“*New Austrian Tunnelling Method*”) passou a ser chamada de solo pregado ou solo grampeado (“*Soil Nailing*”).

O método NATM, introduzido para suporte de galerias e túneis, preconizava a introdução de barras de aço envolvidas com calda de cimento, no perímetro da circunferência de túneis (seções transversais ao eixo longitudinal do túnel), em furos pré-executados, imediatamente após o processo de escavação ter avançado. As paredes do túnel eram então revestidas por uma esbelta camada de concreto projetado.

Esta técnica permitiu uma considerável redução da espessura do revestimento final de sustentação das galerias, já que a técnica até então utilizada ter uma natureza rígida e, por isso, solicitar a estrutura com esforços muito maiores e requerer revestimentos muito mais espessos. A comparação entre os métodos tradicional e o NATM está ilustrada na Figura 1 (Rabcewics, 1964).

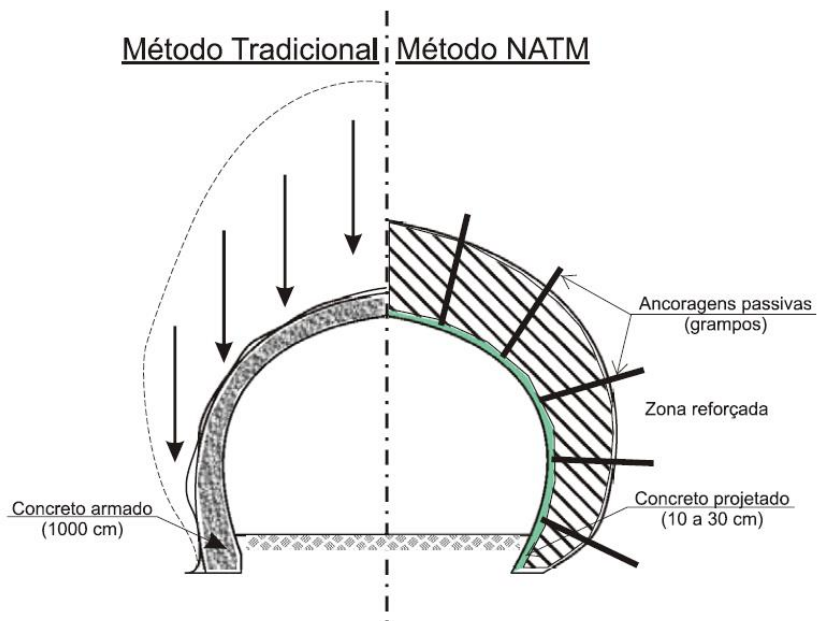


Figura 1 – Comparação esquemática entre os métodos convencional e NATM (Rabcewics, 1964).

A partir de 1975, conforme descrição de Clouterre (1991), a utilização do solo grampeado teve grande avanço na França, Alemanha e EUA e em 1979 passou a ser tema de congressos internacionais, quando se iniciou sua divulgação a nível mundial.

O solo grampeado é um método de reforço “*in situ*” utilizado para a estabilização de taludes naturais ou escavados. É constituído a partir da introdução de elementos passivos (hastes semi-flexíveis, resistentes a flexão composta) nos solos e revestidos por uma camada que garanta a proteção da face do talude, seja concreto projetado, telas metálicas de alta resistência ou, até mesmo, somente a proteção vegetal. Esses elementos passivos, comumente chamados de grampos, podem ser barras ou tubos de aço e/ou barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular. São posicionados horizontalmente, ou inclinados no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (Ortigão, 1996).

As barras deverão resistir basicamente aos esforços de tração, cisalhamento e momentos fletores, que revestidas por calda de cimento ao longo de todo o seu comprimento, são introduzidas no terreno através da execução de um pré-furo

realizado por uma perfuratriz. A função destes grampos é minorar os deslocamentos do maciço terroso pelo acréscimo de forças internas contrárias ao sistema natural de acomodação da massa (Silva, 1999). A descompressão progressiva do solo, em função das sucessivas fases de escavação ou de configuração de ruptura do maciço, gera deslocamentos laterais no solo. Estes deslocamentos, então, induzem ao surgimento de forças internas aplicadas ao sistema de reforço. O comportamento de um sistema de reforço depende da mobilização dos esforços nas inclusões. Os grampos não são protendidos e, conforme comentado acima, a mobilização do reforço depende das movimentações da massa de solo.

A distribuição dos grampos (“densidade de grampos”) na face da massa a ser estabilizada depende, principalmente, da geometria do talude, das propriedades mecânicas do solo e das propriedades mecânicas dos próprios grampos.

A execução de uma obra em solo grampeado, uma escavação por exemplo, se processa em quatro fases distintas: escavação, instalação da primeira linha de grampos e proteção da face do talude, sendo a seqüência repetida até se atingir a cota desejada. Também são executados os elementos de drenagem que devem estar associados a esta técnica. Nos casos onde as características do material terroso permitam, as fases de execução podem variar.

A técnica de solo grampeado possui algumas aplicações mais comuns:

- Estabilização de taludes naturais: Inclusão de reforços em taludes naturais possivelmente instáveis, com inclinações da ordem de 45° a 70°;
- Contenção de escavações temporárias ou permanentes associadas a construções de fundação de edifícios, escavações para vias subterrâneas (metrô ou estacionamentos, mergulhões), cortes para implantação de sistemas viários e escavações para portais de túneis;

- Recuperação de estruturas de contenção, tais como: cortinas de terra armada (substituição das tiras ou conexões danificadas por sobrecargas), muros de concreto armado e cortinas atirantadas.

A Figura 2 a Figura 4 apresentam exemplos de obras de solo grampeado.



Figura 2 – Solo grampeado Cervejaria Imperial – Bingen - Petrópolis
(arquivo pessoal - 2016)



Figura 3 – Construção da Cervejaria Imperial – Petrópolis (arquivo pessoal 2016)

Quando a técnica é utilizada como estrutura de contenção ou em estabilização de escavações, os grampos são geralmente posicionados horizontalmente (ou com pequenas inclinações) e os esforços principais são de tração. Ao contrário, quando os grampos são utilizados para estabilização de taludes naturais, os elementos de reforço podem ser verticais ou perpendiculares à superfície potencial de ruptura e os esforços de cisalhamento e de flexão não devem ser desprezados (Schlosser, 1982).



Figura 4 – Nova subida da Serra de Petrópolis (*arquivo pessoal – 2015*) – Emboque do túnel escavado e ao lado, talude natural.

1.1. Processo Executivo

O processo executivo consiste, basicamente, em fases sucessivas de escavação, procedida pela perfuração, instalação do grampo e injeção. Finalmente, procede-se à execução da face, comumente feita com concreto projetado. No entanto, atualmente outros métodos estão sendo utilizados, principalmente para estabilização de taludes naturais: telas metálicas de alta resistência, proteção com geomanta com

posterior revegetação, etc. A técnica utilizada para contenção de cortes deverá ser executada de forma descendente, a fim de garantir a estabilização do trecho do maciço escavado para avanço do restante do corte, até que atinja a cota recomendada em projeto. Paralelamente a estes serviços, são executados os elementos de drenagem.

Para estabilização de taludes naturais, a instalação dos grampos pode ser realizada de forma descendente ou ascendente, sendo executado da forma que garanta melhor andamento nos serviços. A construção da estrutura em solo grampeado consistirá apenas na introdução dos grampos e execução do revestimento da face (Lima, 2007).

1.1.1. Escavação

As escavações geralmente são realizadas em bermas de equilíbrio (Figura 5 e Figura 6), a fim de se dar mais segurança ao procedimento, com profundidades variando de 1 m a 2 m, em função do tipo de solo.

Durante as sucessivas etapas de escavação, o solo deverá permanecer estável. Realiza-se o monitoramento e, caso o solo apresente deformações, indicando uma possível desestabilização, a proteção da face escavada deverá ser executada o quanto antes.

Geralmente, a face do talude é executada com uma inclinação de 5° a 10°. De acordo com Dringenberg e Craizer (1992), com esta recomendação é possível reduzir a armação do reforço.

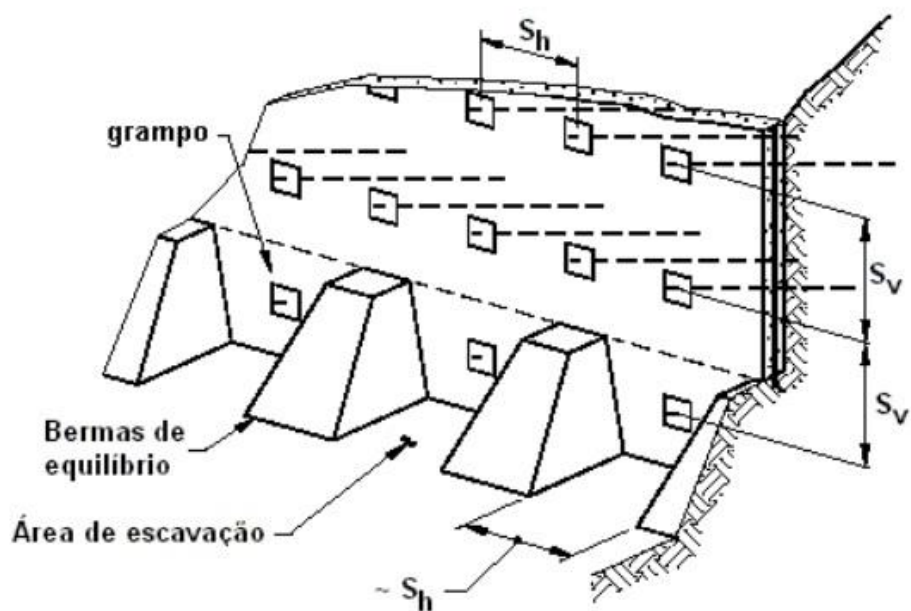


Figura 5 – Processo de escavação em bermas de equilíbrio (Lazarte et. al, 2003)



Figura 6 – Processo de escavação em bermas, execução de solo grampeado

(www.proenggeotecnia.com.br/solophp , 15/07/2015, 15:47)

1.1.2. Perfuração

Realizada a escavação da primeira camada, são executadas as perfurações dos furos com diâmetros, profundidade e ângulos recomendados em projeto. A fixação do grampo na face de concreto pode ser feita por meio de porcas e parafusos, para barras com diâmetros maiores do que 20 mm, ou com a dobra da extremidade quando os diâmetros forem menores do que 20 mm.

Os grampos cravados são introduzidos manualmente (marteletoes manuais) ou com auxílio de marteletoes pneumáticos. Esta técnica é de rápida execução, no entanto, a resistência ao cisalhamento é reduzida, principalmente para solos arenosos. Desta forma, os grampos também são mais susceptíveis a apresentar corrosões. Existe, também, a impossibilidade de não se conseguir cravar com a presença de pedregulhos, além do comprimento do grampo ser reduzido. Por isso, a técnica com perfuração prévia é mais utilizada.

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam detalhes de escavação.



Figura 7 – Detalhe de algumas perfuratrizes utilizadas para execução do furo



Figura 8 – Perfuração para execução de solo grampeado. Obra: Duplicação da Serra do Cafezal, Rodovia Regis Bittencourt, km 353

1.1.3. Injeção

A primeira fase de injeção, denominada de bainha, preenche e reconstitui a face escavada após a execução do furo. A bainha é injetada por meio de tubos auxiliares removíveis, de forma ascendente, proveniente de um misturador coloidal de alta turbulência, até que se extravaze na boca do furo. Pitta (2003) recomenda que o fator água/cimento da bainha varie entre 0,50 a 0,70.

Dependendo do tipo de solo e das recomendações de projeto, há necessidade de aumentar a aderência lateral solo-calda de cimento executando, assim, mais fases de injeção após um período de no mínimo 12 h após a execução da bainha (Zirlis,

2000). Durante essas fases de reinjeção, é possível controlar o volume da calda de cimento, medindo-se a pressão de injeção e o volume de calda injetado (Pitta, 2003).

Os grampos injetados possuem a vantagem de poder ser utilizados em qualquer tipo de solo, mesmo que seja necessária a adaptação do equipamento às características do terreno (Figura 9). Como comentado anteriormente, a resistência ao atrito dos grampos injetados é maior do que a dos cravados. O processo de grampos injetados é o mais utilizado no Brasil. A Tabela 1 reúne as especificações de projeto para grampos injetados.

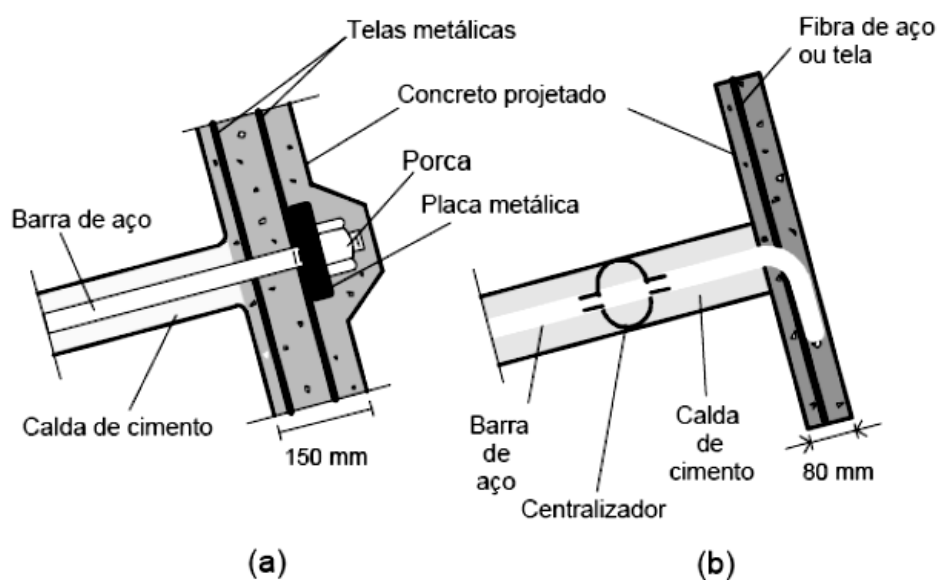


Figura 9 – Fixação dos grampos injetados na face do concreto: (a) Barras com diâmetros maiores do que 20 mm e (b) barras menores do que 20 mm.

Ortigão (1996)

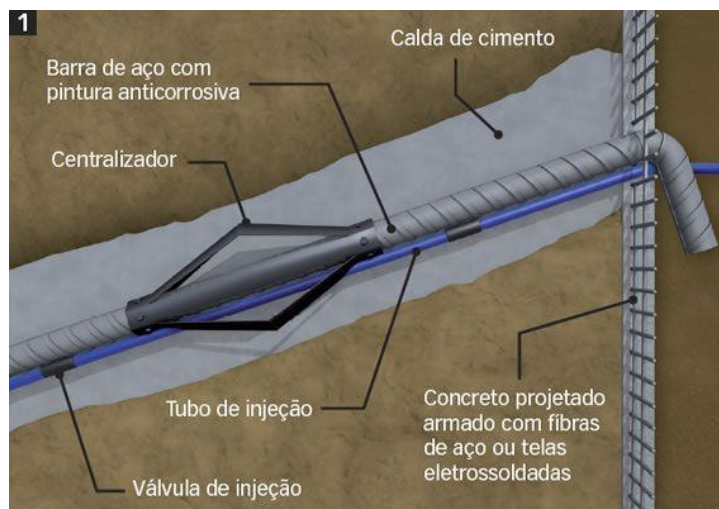


Figura 10 – Detalhe do grampo injetado (<http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/20/artigo271666-1.aspx>, 27/08/2015,16:25)

Tabela 1 – Algumas especificações de Projeto para grampos injetados (Ortigão, 1997)

Especificações de Projeto com grampos injetados (Ortigão,1997).	
Descrição do Item	
Limpeza do Furo	A limpeza do furo, durante a perfuração, deve ser preferencialmente realizada a seco e com ar comprimido. Alguns executores são relutantes em adotar esta prática, pois são mais comuns os equipamentos rotativos que utilizam água ou outro fluido na lavagem.
Aditivos	O expansor da calda de cimento é um importante aditivo, que evita a retração e conseqüentemente diminuição do atrito solo-grampo. Outro aditivo importante é o acelerador de pega, que reduz os prazos de execução do reforço.
Tubo lateral de injeção	A utilização de uma tubulação plástica lateral de injeção deve ser obrigatória especialmente em grampos longos ($L > 3m$), para garantir o preenchimento adequado do furo.
Espaçadores ou Centralizadores	Os espaçadores podem ser fabricados na própria obra com tubos de PVC e instalados a cada 3 m ao longo da barra de aço, garantindo que a mesma seja centrada no furo.

De acordo com Zirlis (1999), durante a perfuração para implantação de um chumbador injetado, deve-se reconhecer três informações essenciais:

- perda do fluido de perfuração;
- ocorrência de vazios;
- reconhecimento de litologias.

Desta forma, ao término da perfuração, será conhecido o real estado do maciço. Ao se injetar calda de cimento, as regiões no entorno da ancoragem que oferecem menor resistência (solos mais fracos ou com descontinuidades) serão consolidadas.

Após as injeções, pode-se obter avaliações melhores das áreas de maior risco, baseados nos volumes e pressões de injeção, e em um ato contínuo, aplicando a densidade exata de ancoragens, obtém-se a estabilidade estimada no projeto.

Geralmente, as características geomecânicas adotadas para as análises de estabilidade, advém de sondagens SPT. Essas sondagens, por serem puntiformes, pouco podem evidenciar determinadas características do maciço. Na medida em que se tem o comportamento geomecânico do maciço, via injeção, e com as melhorias propiciadas pela mesma, como adensamento do solo, colagem das fissuras e a maior aderência barra-solo, é de se esperar que os resultados encontrados em ensaios comparativos com bainha x bainha + fases de injeção, mostrem melhor capacidade de aderência, portanto exigindo maior energia para o arrancamento dos chumbadores injetados com mais fases.

Conclui-se que o ato de injetar um chumbador não se resume somente à melhoria de ancoragem do mesmo. Quando se aplica a injeção de fluídos cimentantes, pode-se “sentir” o comportamento dessas descontinuidades tectônicas ou litológicas e de vazios. A Figura 11 ilustra detalhes dos equipamentos de injeção.



Figura 11 – Detalhe dos equipamentos de injeção: Bomba Injetora e Misturador Helicoidal (www.rudloff.com.br/concreto-protendidocatalogo-tela.php, 17/08/2015, 15:34)

1.1.4. Revestimento da face

Geralmente o revestimento é realizado com concreto projetado sobre uma malha de aço eletrosoldada ou concreto reforçado com fibras metálicas. A tela eletrosoldada é a forma mais convencional de revestimento da face. Atualmente, há várias pesquisas sobre a utilização de fibras metálicas ou de polipropileno adicionadas diretamente na betoneira. A utilização destas fibras tem como vantagem a redução nos custos e tempo de execução, pois se economiza mão-de-obra utilizada para a colocação e confecção das telas metálicas. O revestimento da face também pode ser realizado com painéis pré-fabricados de concreto ou com revestimento vegetal, que proporcionam um melhor efeito estético ao talude. A utilização de taludes com revestimento vegetal é limitada a taludes com inclinações mais suaves (Pinto e Silveira, 2001), figuras 12 e 13.

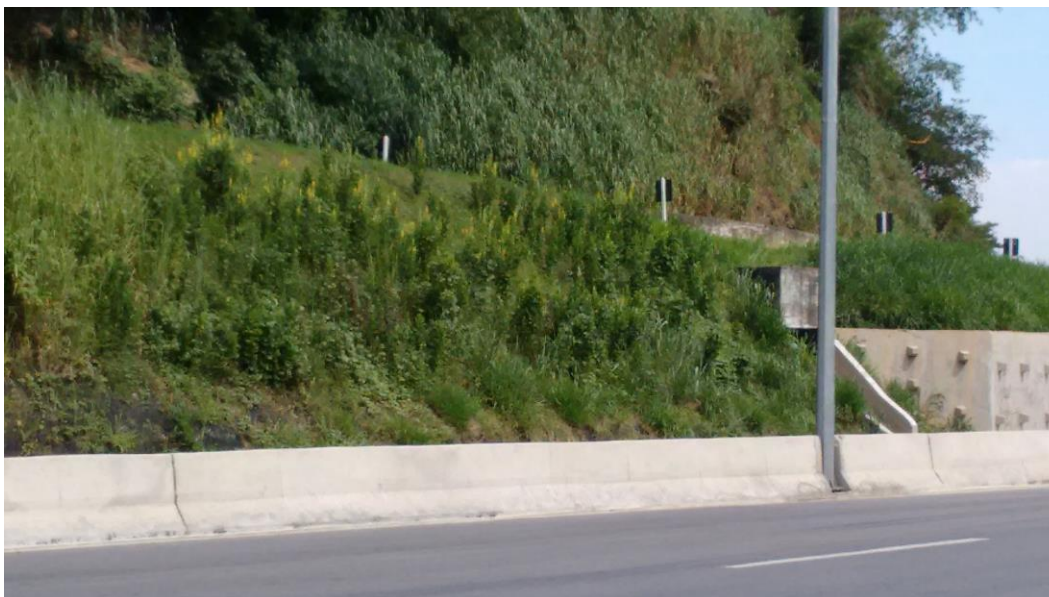


Figura 12 - Solo grampeado com revestimento vegetal – Praça do Pedágio – subida Petrópolis (arquivo pessoal 2015)



Figura 13 - Concreto Projetado - combinação de talude natural e escavado – Desemboque do novo túnel da nova subida de Petrópolis (arquivo pessoal 2015)

O revestimento da face do talude não possui função estrutural, por absorver apenas pequenos carregamentos, mas é responsável pela estabilização da face, evitando as rupturas localizadas e protegendo a face dos processos erosivos causados pelas chuvas e intempéries.

Um dos objetivos desta pesquisa visa analisar o comportamento dos deslocamentos na face do talude para diferentes espessuras de paramento, analisando a influência do revestimento no comportamento da estabilização.

Mais adiante será realizada uma abordagem um pouco mais abrangente sobre os tipos de revestimento da face.

1.1.5. Drenagem

Simultaneamente aos processos de escavação, fixação dos grampos e revestimento da face, é também executado um sistema de drenagem, que deve ser dimensionado para prevenir a estrutura dos efeitos nocivos da infiltração da água. A água pode gerar um aumento da poropressão que ocasiona a redução da resistência do solo e, por consequência, redução da resistência da estrutura, além de prejudicar a estrutura das barras que podem ser afetadas pela corrosão. A drenagem é indispensável, sendo geralmente executada por um sistema de drenagem profunda e superficial.

Na drenagem profunda são utilizados os drenos sub-horizontais profundos, que captam a água distante da face do talude e conduzem para as canaletas localizadas no lado externo da face. São instalados tubos plásticos drenantes com diâmetros de 40 mm a 60 mm, que são inseridos através de perfurações no solo de 40 mm a 100mm. Estes tubos são perfurados e revestidos com manta de geotêxtil ou tela de nylon e

devem ter comprimento maior que o dos grampos. O espaçamento entre os drenos depende de fatores com condições locais como nível d'água, permeabilidade do solo e índices pluviométricos.

A drenagem superficial deve ser feita com drenos do tipo barbacã e drenos lineares contínuos (Figura 14). Os drenos tipo barbacã são responsáveis por uma drenagem pontual e devem abranger toda a superfície do talude. Um tubo de PVC drenante, com inclinação descendente, liga este dreno ao exterior do paramento e direciona a água para fora do talude (Lima, 2007).

Os drenos verticais ou drenos lineares contínuos são instalados verticalmente atrás da parede do paramento, desde a crista até o pé do talude. São constituídos por uma calha drenante revestida com geotêxtil em uma escavação aproximada de 10 cm x 30 cm e conduzem a água captada para a canaleta de pé.

Para finalizar os sistemas de drenagem, são executadas as canaletas de crista e de pé que são moldadas no local e revestidas em concreto projetado (Springer, 2006).

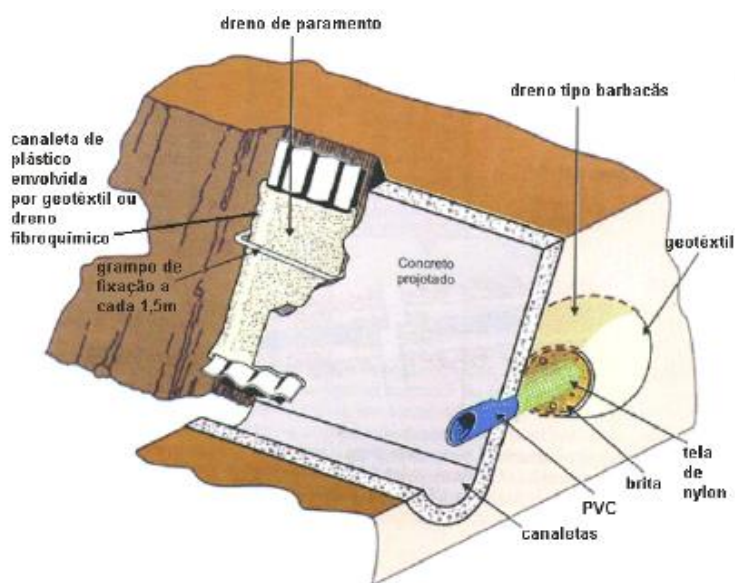


Figura 14 - Detalhe do dreno linear contínuo e tipo barbacã (Zirlis et.al. 1999)

Vale ressaltar que a maioria dos problemas encontrados em estruturas de contenção está relacionado com problemas na deficiência dos elementos de drenagem. Geralmente vistas como intervenções auxiliares, as obras de drenagem são tão importantes quanto a estrutura em si. Os elementos de drenagem são de suma importância para garantir a estabilidade da obra.

É também conveniente executar uma pequena ficha com o próprio paramento, abaixo do nível final da escavação, evitando a possibilidade de carreamento de finos por ação da infiltração de água. A profundidade da ficha (f) depende essencialmente da qualidade do terreno, bem como da geometria do paramento. Para efeito de projeto, pode-se adotar $f = 0,20$ para solos de alteração de rocha, e $f = 0,40$ para solos em geral (Lima Filho, 1996).

1.2. Vantagens e desvantagens da técnica de solo grampeado

A estabilização de taludes em solo grampeado apresenta algumas vantagens em relação às técnicas similares e normalmente utilizadas, tais como: cortinas atirantadas, muros de concreto armado e outras. Mitchel e Villet (1987) apresentam as vantagens e desvantagens desta técnica:

- Baixo custo: No solo grampeado o único elemento estrutural utilizado para a estabilização são os grampos. A proteção do talude em concreto projetado ou outro revestimento, como por exemplo: revestimentos pré-fabricados, proteção superficial com vegetação, entre outros; têm custos relativamente mais baixos e podem permitir uma considerável economia em relação às soluções convencionais;
- Equipamentos leves: O solo grampeado pode ser executado utilizando-se equipamentos leves e de fácil manuseio. Em geral são utilizadas sondas rotativas de pequeno porte para a execução dos furos e a injeção da calda de cimento se processa, em geral, por gravidade. O revestimento pode ser

aplicado manualmente ou utilizando-se um equipamento de projeção de concreto;

- Adaptação às condições locais: O processo executivo do solo grampeado permite uma grande flexibilidade de adaptação do projeto às condições geométricas do talude, inclinação da face, e distribuição e dimensionamento dos grampos nos diversos estágios da construção;
- Produtividade: As técnicas utilizadas na execução do solo grampeado permitem uma produtividade muito grande. O tempo de execução é, em geral, muito menor se comparado às soluções convencionais. O solo grampeado pode ser utilizado em diversos tipos de solos e com variedade de seções geométricas. No entanto, algumas limitações devem ser respeitadas, como altura da escavação, por exemplo;
- Flexibilidade: Estruturas em solo grampeado são flexíveis e compactas, apresentando adequada resistência a esforços dinâmicos. Por isso, esta técnica mostra-se interessante para regiões com terremotos (Shen et.al. 1981);
- Possibilidade de ajuste no projeto: Com o avanço das escavações e o conhecimento do material exposto durante a escavação, a técnica de solo grampeado permite adaptações do projeto. Com isso, há a possibilidade de reduzir custos, caso o material encontrado possua características melhores ao projetado.

As desvantagens mais importantes são:

- Presença de nível d'água: O uso da técnica de grampeamento na presença de água deve estar associado a um eficiente sistema de rebaixamento permanente do lençol;
- Em condições de drenagem inadequada, particularmente em solos argilosos, pode-se ter elevados graus de saturação, aumento de poropressão e significativas reduções no atrito solo x grampo. Esse fato associado a um aumento na tensão horizontal (empuxo hidrostático), pode levar a massa de solo grampeado a situações críticas;

- Grampos são elementos passivos, então decorrem, naturalmente, movimentações quando da sua mobilização. Situações onde os deslocamentos do solo grampeado possam causar danos a estruturas vizinhas devem ser consideradas. No entanto, esses deslocamentos são em geral pequenos e, na maioria dos casos, não inviabilizam a adoção dessa solução;
- O uso pode ser dificultado para certos tipos de solo: areias sem coesão aparente, ou em solos contendo alto percentual de argila, onde o teor de umidade poderia aumentar depois da construção, devido ao possível ingresso de água que acarretaria uma perda de resistência de solo e, conseqüentemente, uma significativa perda da resistência ao cisalhamento solo-grampo (Bolton e Stewart, 1990; Davis e Morgan, 2005). Um decréscimo nos valores de resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo pode se tornar evidente se, depois da construção, o solo se tornar saturado (Schlosser e Unterreiner, 1990). Em solos não-coesivos, não é possível garantir a estabilidade de escavações verticais (as escavações, com cerca de 1,0 m a 2,0 m de altura, deverão permanecer estáveis por um ou dois dias, em média para prosseguimento do outro trecho a ser escavado). A eficácia do solo grampeado pode não ser comprovada em solos argilosos de menor consistência, com N_{SPT} inferior a 10 golpes, pela dificuldade de manter a face da escavação estável antes da execução do concreto projetado (Clouterre, 1991).

1.3. Comportamento mecânico do solo grampeado

O mecanismo de interação solo-reforço no sistema solo grampeado varia amplamente com a metodologia executiva, com o tipo de aplicação (estrutura de contenção ou estabilização de taludes naturais), com as propriedades do solo e com as características dos reforços (comprimento da barra, tipo de barra de aço, diâmetro da coluna da calda de cimento e inclinação do reforço). Com exceção das características mecânicas do solo, todos os outros fatores podem ser controlados e padronizados na execução dos chumbadores.

Como a estabilidade de uma contenção em solo grampeado é, na maioria das vezes, avaliada em seu estado limite último, um parâmetro muito importante em projeto é a resistência ao cisalhamento desenvolvida na interface entre o reforço e o solo circundante (q_s). Este parâmetro é responsável pelo mecanismo de transferência de carga e restrição do movimento do maciço de solo, durante e após a sua escavação. Como os reforços trabalham basicamente sob tração, quanto maior for este parâmetro, melhor será o desempenho do reforço na estabilização do maciço de solo. Entretanto, como o q_s é influenciado por diferentes fatores, a sua previsão torna-se, na maioria das situações, imprecisas e conservadoras.

A realização de ensaios de arrancamento *in situ* permite um maior conhecimento deste parâmetro e possibilita a realização de projetos executivos mais econômicos e viáveis.

O valor de q_s é obtido a partir do diâmetro do furo (ϕ_{furo}), do comprimento da interface solo-calda de cimento (L_s) e da carga máxima (T_l) obtida no ensaio. O valor de q_s é definido em unidades de tensão, normalmente em kPa.

$$q_s = \frac{T_l}{\pi \times \phi_{furo} \times L_s}$$

Na atual prática de execução verifica-se que o parâmetro q_s , desenvolvido na interface solo-reforço, conforme citado acima, pode ser consideravelmente melhorado com a realização de fases de injeção posteriores ao preenchimento do furo para a introdução dos chumbadores (bainha).

A massa de solo grampeado pode ser subdividida em duas zonas: a zona ativa, compreendida entre a face do talude e superfície potencial de ruptura (essa região é potencialmente instável e tem sua estabilidade garantida pela presença dos grampos), e outra, chamada de zona passiva, onde os grampos são ancorados. Os esforços nos grampos só serão mobilizados caso ocorram deslocamentos da zona ativa em relação à zona passiva.

As solicitações começam a atuar durante o período construtivo da obra, quando as deformações do solo ainda são muito pequenas e as principais solicitações nos grampos são devido aos esforços de tração. No entanto, quando a face do talude é

inclinada com relação à vertical, pequenos esforços cisalhantes e de flexão podem atuar na estrutura, próximo à face de escavação e não devem ser desprezados. Dessa forma, para se obter a estabilidade, o grampo deve resistir, além das solicitações normais, aos efeitos combinados de cisalhamento e flexão na região da superfície de ruptura e junto à face do talude, devido ao sistema de conexão ou rigidez da parede.

Com o aumento das escavações, ocorre o aumento dos esforços de tração, progressivamente, devido à descompressão lateral (Clouterre, 1991). No caso de reforço de uma estrutura já existente ou de um talude natural, as deformações laterais estão associadas a movimentações já em curso na estrutura ou no talude.

Os deslocamentos são de pequena magnitude e necessários para que haja mobilização dos esforços nos grampos (Schlosser, 1982). Os valores máximos geralmente ocorrem no topo. O deslocamentos esperados são da ordem de 0,1 a 0,5% da altura da contenção (Cartier e Gigan, 1993; Clouterre, 1991).

O deslocamentos no topo das estruturas dependem de diversos fatores, como: altura do talude de escavação, sequência construtiva, espaçamentos entre os grampos, razão entre o comprimento do grampo e a altura do muro, inclinação do grampo e capacidade de suporte do solo de fundação (Springer, 2001).

Os modos de ruptura de uma estabilização em solo grampeado e as principais verificações que devem ser analisadas no desenvolvimento dos projetos são:

- resistência ao arrancamento do grampo na zona passiva;
- resistência do grampo a esforços de cisalhamento e flexão;
- resistência estrutural da face (de menor importância)

Clouterre (1991) ilustra os esforços solicitados (cisalhantes e momentos fletores) em um muro experimental de solo grampeado, figura III. Durante o cisalhamento, o rompimento das inclusões pode ocorrer devido a esforços de tração (T_0) na interseção com a superfície de ruptura, ou por plastificação nos pontos de momentos fletores

máximos (M_{max}), que se localizam fora da linha de ruptura. A ruptura também pode ocorrer por falta de aderência, quando as tensões cisalhantes alcançam o valor limite da resistência ao arrancamento (q_s).

1.3.1. Resistência ao Arrancamento (q_s)

Um dos parâmetros para o dimensionamento de uma estrutura em solo grampeado é o atrito desenvolvido entre o grampo e o solo, denominado atrito solo X grampo e designado por (q_s).

Este parâmetro pode ser obtido através de ensaios de arrancamento executados em verdadeira grandeza ou, alternativamente, para uma estimativa inicial, através de correlações empíricas com parâmetros do solo obtidos em ensaios de laboratório e/ou campo.

Não se dispõe ainda de uma norma para a realização de ensaios de arrancamento. Existem, no entanto algumas recomendações de controle.

Falconi e Alonso (1997) propõem a realização de um ensaio de arrancamento para cada dez grampos permanentes.

A Fundação GEORIO (1999), através do seu manual sugere que os ensaios de arrancamento sejam realizados durante a obra, em pelo menos dois grampos ou em 1% do total previsto, para que sejam confirmados os valores da resistência q_s especificados em projeto. Esses ensaios, realizados à medida que a obra avança, permitem ajustes de projeto.

Zirlis e outros (2000) sugerem a execução de ensaios de arrancamento em 10% do total de grampos previsto, ou numa quantidade tal que garanta a representatividade dos resultados.

O cálculo da força máxima admitida em um grampo é feito através da seguinte expressão, conforme mostrada anteriormente:

$$q_s = \frac{T_i}{\pi \times \phi_{furo} \times L_s}$$

Onde:

\varnothing_{furo} = Diâmetro do furo;

L_s = Comprimento injetado do grampo;

q_s = Resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo

T_l = Força normal máxima (carga que leva o grampo à ruptura por cisalhamento com o solo).

Os principais fatores que podem influenciar na resistência unitária q_s são as características mecânicas do solo, as características mecânicas da calda de cimento, a metodologia executiva dos furos e o processo de injeção.

Segundo Ortigão (1997), o desempenho do grampo quanto à resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo, pode ser melhorado com os seguintes cuidados:

- Materiais e fator água-cimento: empregando componentes de calda de cimento adequados, com fator de água cimento apropriado;
- Aditivos: um importante aditivo é o expansor da calda de cimento, que evita a retração e, conseqüentemente, diminui o atrito. Outro aditivo é o acelerador de pega, permitindo a mobilização do reforço em menor tempo;
- Tubo lateral de injeção: a utilização de uma tubulação plástica lateral de injeção deve ser prática obrigatória, especialmente em grampos longos com comprimento maior do que 3 metros, já que é essencial que a calda preencha todo o furo;
- Espaçadores e Centralizadores: são dispositivos simples que podem ser fabricados na própria obra, instalados a cada 2 ou 3 metros ao longo da barra de aço. Garantem que a barra seja centrada no furo.

1.3.2. Descrição do Ensaio de Arrancamento

Os ensaios são realizados por meio da inserção de um grampo, com um trecho livre de 1m e um trecho injetado ou ancorado. O grampo é tracionado e a carga de tração é medida por meio de uma célula de carga. O macaco hidráulico aplica as forças

de tração na barra de aço. O deflectômetro tem a função de registrar os deslocamentos na cabeça do grampo submetido à força aplicada. Por fim, obtém-se a curva carga-deslocamento, de onde se obtém o valor máximo da força de tração no grampo e o seu deslocamento correspondente.

Existem duas formas de se realizar o ensaio de arrancamento: com velocidade constante ou em estágios de carregamento. Os ensaios com velocidade constante permitem determinar a força de arrancamento máxima, a força residual e a inclinação inicial da curva força-deslocamento. A partir desta curva, podem ser determinadas as resistências ao cisalhamento da interface máxima e a residual.

A carga máxima do ensaio (T'_{max}) é dada pela seguinte equação:

$$T'_{max} = 0,90 \times \sigma_{aço} \times A_s$$

Onde: $\sigma_{aço}$ = tensão do escoamento do aço; A_s = área da seção transversal útil da barra.

Esta carga não deve ser ultrapassada para evitar um acidente devido à possível ruptura brusca do aço.

As cargas deverão ser aplicadas em pequenos estágios que não excedam 20% da carga máxima esperada, aguardando pelo menos 30 minutos para estabilização das deformações. Durante esse tempo a carga é mantida constante e os deslocamentos são lidos a intervalos de 0, 1, 2, 4, 8 e 15 minutos.

A medição da carga de tração aplicada deve ser mantida por uma célula de carga com acurácia entre 0,5% a 1%, como na maioria dos transdutores elétricos. O uso de macaco bomba aferido deve ser evitado, pois os erros são frequentemente significativos (Ortigão, 1997).

Mais detalhes sobre o procedimento de ensaios são apresentados por Falconi e Alonso (1997) e Clouterre (1991).

A quantidade de barras ensaiadas deve ser representativa ao tamanho da obra. Em obras de grande porte, os ensaios de arrancamento devem ser feitos antes e durante a

execução da obra, com o objetivo de se obter o valor unitário do atrito solo-grampo (q_s) e adequar o projeto aos resultados destes ensaios. Em obras de pequeno porte, infelizmente, o ensaio raramente é realizado.

Clouterre (1991) apresenta uma sugestão do número mínimo de grampos a serem ensaiados segundo a área de grampeamento a ser executada, tabela 02.

Georio (2000) sugere que ao menos 1% dos grampos sejam ensaiados, de modo a confirmar a resistência ao arrancamento projetada.

Os ensaios de arrancamento podem ser classificados em 3 tipos, conforme o objetivo e a fase de construção em que são executados:

Tabela 2 – Número de Grampos a serem ensaiados (Clouterre,1991)

ENSAIOS DE ARRANCAMENTO			
Área da Face (m ²)	Preliminares e de conformidade	Área da face (m ²)	De inspeção
até 800	6	Até 1000	5 (para cada camada de solo) 1(para cada fase de escavação)
800 a 2000	9		
2000 a 4000	12	Maior 1000	Aumenta-se em 1 para cada 200m ²
4000 a 8000	15		
8000 a 16000	18		
16000 a 40000	25		

1.3.3. Resistência à tração

Os esforços de tração são os que mais solicitam os grampos. As tensões nas extremidades livres das barrassão nulas e crescem até um ponto de tração máxima, mo interior da massa de solo reforçada. A posição de máxima tração, geralmente incide sobre a superfície de ruptura e possui um formato diferente do plano de ruptura proposto por Rankine. Por meio de resultados experimentais, Clouterre (1991) concluiu que a linha máxima de tração se localiza a $0,30H$, sendo H a altura da camada a ser estabilizada. Byrne et. al (1998) defendem que a mesma se concentra em $0,30H$ a $0,35H$. Lima (2002) defende que esta posição pode variar de acordo com a inclinação do talude. Ele ainda ressalta que a distância do topo da

escavação até a superfície de ruptura pode variar de acordo com o tipo de solo e grampos existentes.

Springer (2001) com auxílio de método numéricos, conclui que os pontos de tração máxima variam em função da forma de fixação dos grampos à face do talude. Nos grampos fixos, a tração máxima ocorre junto à face enquanto nos grampos livres este ponto é localizado em um ponto interno do maciço.

1.3.4. Resistência aos esforços cisalhantes e momentos fletores

A mobilização dos momentos fletores requer que o grampo apresente rigidez transversal. Deste modo, os grampos flexíveis (diâmetros menores) não podem mobilizar momentos fletores.

Para taludes de pequenas dimensões, se comparados com taludes de mineração que chegam a centenas de metros, a flexão tem importância no comportamento do modelo de ancoragem.

Por se tratar de inclusões passivas (sem protensão), é necessário um pequeno deslocamento entre o grampo e o maciço para a mobilização da resistência dos esforços. A resistência aos esforços de tração é atingida para deslocamentos muito menores do que os deslocamentos necessários para mobilizar os esforços transversais de cisalhamento e de flexão (Bridle e Davies, 1997). Modelos e experimentos em escala real demonstraram que a resistência dos grampos à flexão é mobilizada num estado próximo à ruptura quando a superfície de cisalhamento se desenvolve ao longo da massa de solo grampeado.

1.4. Tipos de Paramento – Revestimento da face

A técnica de Solo Grampeado apresenta-se em plena expansão e ganhando cada vez mais aceitação em obras geotécnicas de estabilização de taludes e escavações de subsolos. Em função disto, diversas técnicas estão sendo estudadas e analisadas visando melhorias na relação custo x benefício x agilidade nas obras. Já existem diferentes tipos de revestimento da superfície escavada: concreto projetado com armação comum, com tela eletrosoldada, concreto com fibras metálicas ou de polipropileno adicionadas diretamente na betoneira, revestimento

vegetal, revestimento com tela metálica, revestimento com tela metálica em combinação com geomanta.

Um dos objetivos do presente trabalho consiste na avaliação da influência da espessura do paramento nas deformações do talude escavado. Sendo assim, apresenta-se uma breve descrição dos tipos de paramento usados em obras de solo grampeado.

1.4.1. Concreto Projetado

Concreto Projetado é a denominação que se dá à condição em que são construídas peças de concreto sem a utilização de forma, por meio de condução de ar comprimido.

Existem duas maneiras de se obter o Concreto Projetado: “via seca” ou “via úmida”. A diferença básica entre elas está no preparo e condução dos componentes do concreto.

- Via Seca: preparado a seco. A adição de água se dá, junto ao bico de projeção, instantes antes da aplicação;
- Via Úmida: preparado com água e, desta forma, conduzido até o local de aplicação.

Ambas as técnicas utilizam traços e equipamentos com características especiais. A Figura 265 apresenta uma face em concreto projetado.



Figura 15 – Face em concreto projetado (arquivo pessoal 2015) – Nova Subida da Serra de Petropolis

Para obtenção por via seca, são necessários os seguintes equipamentos e acessórios:

- Bomba de Projeção: recebe adequadamente misturado o concreto seco e o disponibiliza para aplicação (é necessário que os equipamentos tenham perfeitas condições de trabalho, estando as peças de consumo com desgaste aceitável e a máquina sempre bem ajustada);
- Compressor de Ar: acoplado à bomba de projeção fornece energia em vazão e pressão correta, para conduzir o concreto até o local da aplicação;
- Bomba d'água: fornece água em vazão e pressão junto ao bico de projeção. Pode ser substituído pela rede pública de fornecimento de água;
- Mangote: é o duto por onde o concreto é conduzido da bomba ao ponto de aplicação, podendo ser de borracha ou metálico;
- Bico de Projeção: peça instalada na extremidade de saída do mangote junto à aplicação;
- Anel d'água: acoplado entre o final do mangote e o bico de projeção, adiciona água ao concreto;
- Pré umidificador: instalado cerca de 3,0 m do bico de projeção, visa fornecer água ao concreto seco, previamente à aplicação.

O concreto poderá ser fornecido usinado, em caminhões betoneiras, ou preparado no canteiro de obras. A Figura 16 ilustra a técnica de execução do concreto projetado.



Figura 16 – Execução do concreto projetado

Normalmente, a resistência solicitada em projeto é de 20 MPa. Como agregados, tem-se o pedrisco ou pedra zero, e a areia média. É necessário que ambos tenham uma umidade mínima. A areia em torno de 5%, nunca inferior a 3%, pois causaria muita poeira, nem superior a 7% causando entupimentos de mangote e início de hidratação do cimento.

O cimento poderá ser qualquer, Comum, Composto, Pozolanico, Alto Forno, ARI ou ARI-RS, dependendo das especificações de projeto. Pode-se utilizar aditivos aceleradores de pega, secos ou líquidos conforme necessidade da obra.

A água deverá ser conforme recomenda a tecnologia do concreto. Sua dosagem é feita pelo mangoteiro por meio de registro junto ao anel d'água. Advém de sensibilidade e da experiência adquirida em outras obras pelo operador. Existem várias práticas de pré umidificação da via seca, conforme mostra a

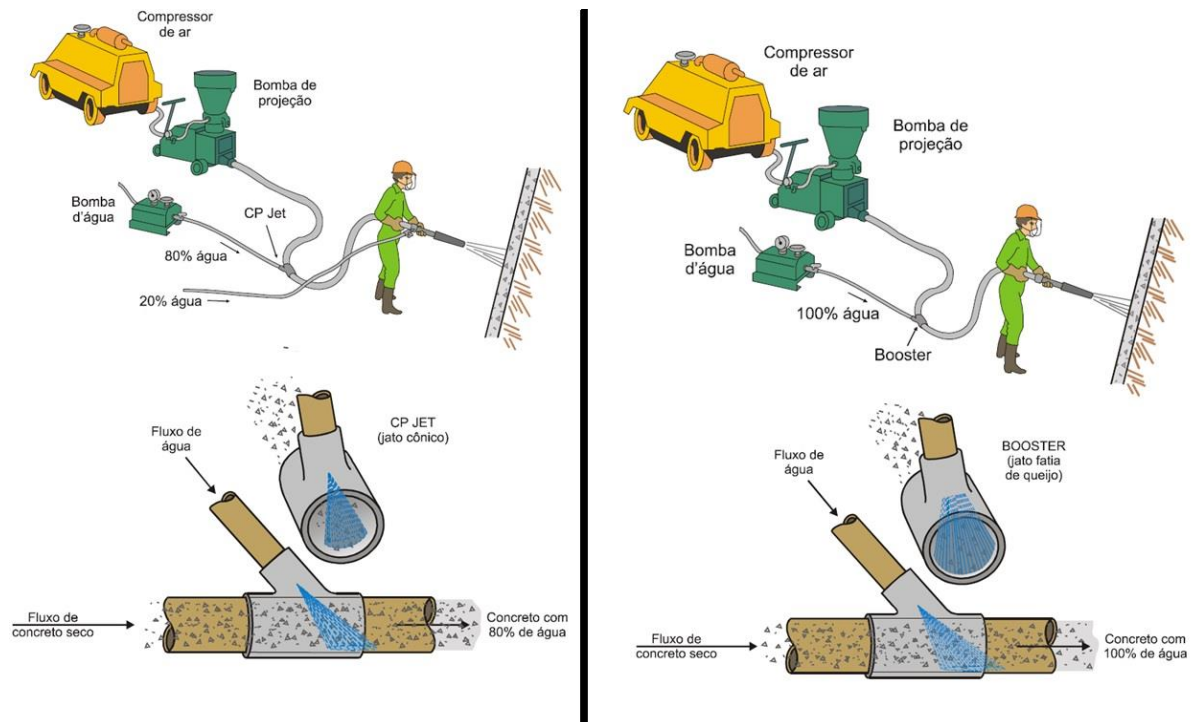


Figura 17:

- CPJET – Neste caso 80% da água é fornecida ao concreto cerca de 3,0 m antes da aplicação e o restante, 20%, adicionado pelo mangoteiro.
- BOOSTER – Nesta situação, 100% da água é aplicada 3,0 m antes da aplicação.

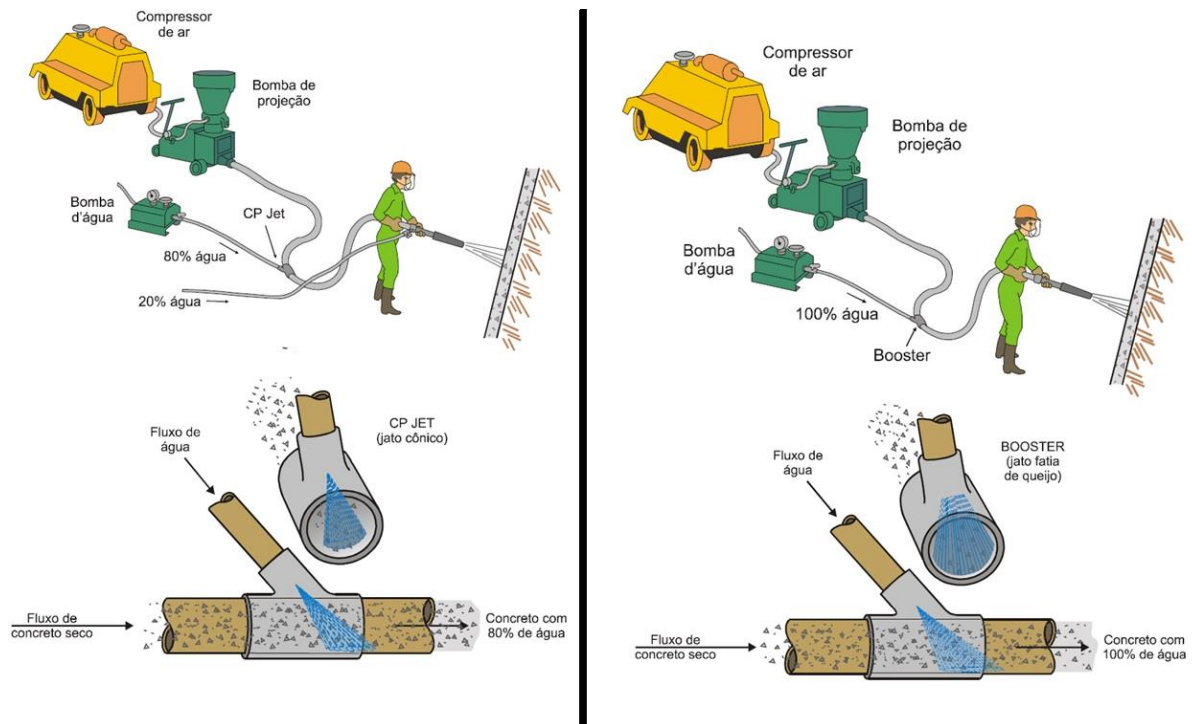


Figura 17 – Comparação de dois métodos de pré-umidificação da via seca: CPJET x BOOSTER

Tão importantes quanto os itens de agregados e os equipamentos, são os aplicadores do concreto. Usualmente, conta-se com dois especialistas: o mangoteiro e o bombeiro. O bombeiro está sempre junto à bomba de projeção, ajustando-a conforme os desgastes ocorrem, e verificando o correto fornecimento do compressor. O mangoteiro é aquele que aplica o concreto, em movimentos contínuos usualmente circulares, dirigidos ortogonalmente à superfície, dela distando 1,0 m. Além disso, o mangoteiro regula a água, e tem sensibilidade para perceber uma oscilação nas características de vazão e pressão do ar. É o elemento fundamental neste serviço, já havendo inclusive norma da ABNT, “NBR 13597 – Procedimento para Qualificação de Mangoteiro de Concreto Projetado aplicado por Via Seca”, para qualificação deste profissional.

As telas eletrosoldadas têm sido a armação convencional do concreto projetado. Sua instalação ocorre em uma ou duas camadas, conforme especificação do projeto (Figura 18). Cuidado deve ser tomado para evitar que a tela funcione como anteparo e cause vazios atrás da mesma.

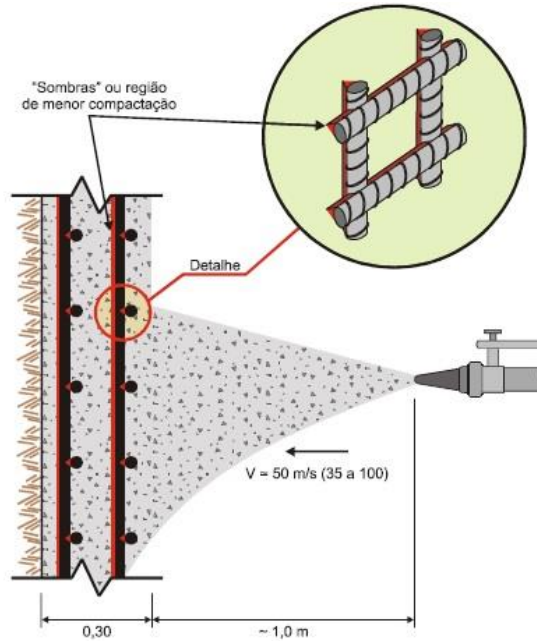


Figura 18 – Detalhe da armação – Concreto Projetado

Desde 1992 são utilizadas de forma alternativa às telas, as fibras metálicas de aço. São adicionadas diretamente na betoneira ou caminhão betoneira, resultando em uma mistura perfeitamente homogênea (Figura 19). Não obriga qualquer mudança em equipamento e consegue promover redução da equipe de trabalho, visto que não há necessidade de mão de obra para preparo e instalação das telas. Tem ajuste perfeito ao corte realizado no talude, aceitando superfícies irregulares, com espessura constante. A Figura 21 compara as duas técnicas.



Figura 19 – Detalhe das fibras metálicas misturadas no concreto

(www.neomatex.com.brconcreto-fibras-polipropileno, 17/08/2015, 17:24)



Figura 20 – Aplicação: concreto projetado com fibra metálica
 (www.neomatex.com.brconcreto-fibras-polipropileno, 17/08/2015, 17:24)

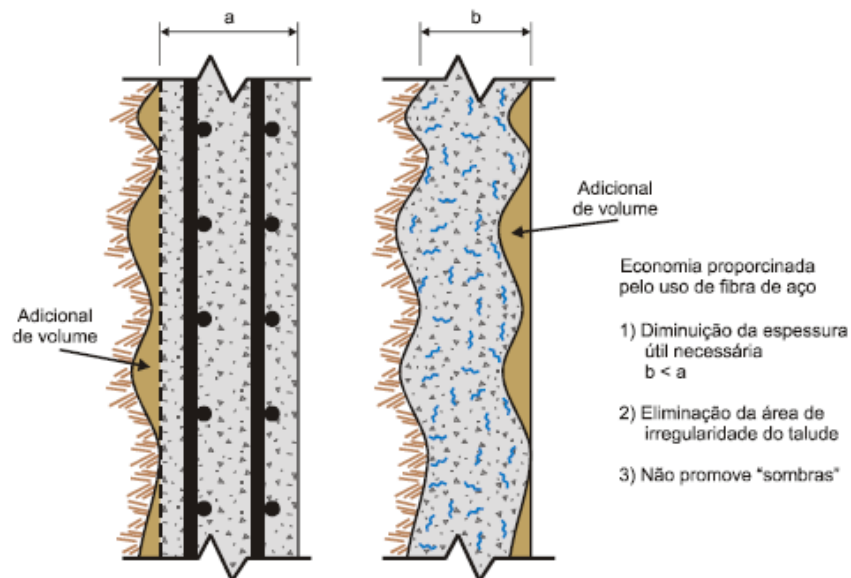


Figura 21 – Comparação: tela metálica x fibras metálicas

A presença das fibras produz concreto de baixa permeabilidade, uma vez que age no combate às tensões de tração durante o início da cura, homogeneamente em todas regiões da peça. Não há cuidado especial com cobertura de armadura, pois a corrosão eventual se limita aquela fibra que estava em contato com a atmosfera, não prosseguindo para as outras imersas no concreto. Apesar de seu custo, cerca de 20% superior às telas, a economia do produto final é de 20 a 40% por metro quadrado aplicado.

O benefício que mais se destaca é a possibilidade das fibras serem adicionadas no caminhão betoneira na central dosadora de concreto, ou na própria betoneira na obra. Assim, o concreto já chega pré-reforçado na obra, eliminando a etapa de posicionamento das telas ou armaduras de aço.

Com um custo mais elevado, pode-se associar ao concreto as fibras de polipropileno (Figura 22). Estas fibras podem tornar o concreto mais durável por meio da redução de fissuras de retração plástica, e mais dúctil com o aumento da tenacidade do material melhorando as propriedades de impacto. Um estudo mais adequado é necessário para a correta utilização destas fibras, já que seu custo é elevado.



Figura 22 – Fibras de polipropileno

(www.neomatex.com.br/concreto-fibras-polipropileno, 17/08/2015, 17:24)

A tendência atual é a total substituição das telas por fibras de aço, em função da agilidade e do custo inferior. Estas novas tecnologias foram incorporadas rapidamente pela facilidade de manuseio, mistura e ganho de economia do tempo na obra.

1.4.1. Revestimento Vegetal

Muitas vezes, principalmente para taludes naturais, a proteção da superfície é realizada com revestimento flexível (tela metálica) associado à geomanta com a adição de sementeira (Figura 23). Esta técnica é capaz de proteger a área dos grampos e minimizar a infiltração da água na superfície do talude.

Nos taludes inclinados até aproximadamente 60° , e em frente a escavações moderadas onde não se esperam grandes deslocamentos, o revestimento superficial pode ser realizado com estruturas flexíveis. Esta técnica diminui consideravelmente o custo global da obra e melhora a estética, pois dependendo do local, a vegetação apresenta um desenvolvimento perceptível logo após o seu plantio, criando uma face verde. Outra vantagem, consiste na minimização do impacto visual.

As Figura 24 a Figura 27 ilustram obras executadas com revestimento vegetal.

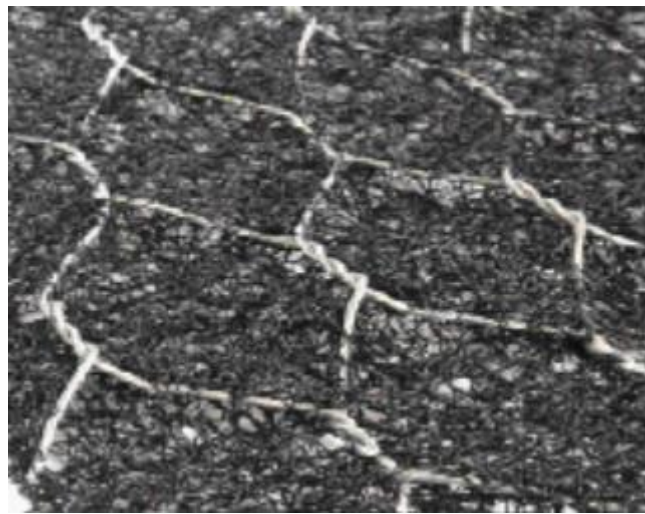


Figura 23 – Geomanta reforçada com malha de aço de dupla torção



Figura 24 – Instalação da geomanta no talude em Angra dos Reis (Maccaferri, 2011)



Figura 25 – Final da obra em Angra dos Reis (Maccaferri, 2011) – Revestimento vegetal



Figura 26 – Face com revestimento vegetal – Revista técnica



Figura 27 – Revestimento com tela TECCO de alta resistência – Geobrugg

(<http://www.geobrugg.com>, 17/07/2015, 18:47)

1.4.2. Blocos Pré-moldados de concreto

A preocupação com a estética da obra passou a ser uma realidade para os projetistas e executores das intervenções.

Como mencionado anteriormente, o revestimento da face tem uma função secundária no processo de estabilização do talude. Sua atuação se restringe, basicamente, a impedir rupturas localizadas e garantir um controle do processo erosivo do terreno junto à face.

A utilização de blocos pré-moldados de concreto como elemento de face consegue agregar um valor estético à obra, possibilitando desenhos arquitetônicos e formação de jardineiras suspensas na face da estabilização.

A face é constituída de blocos segmentais de concreto, com dimensões de 20 cm (altura), 40 cm (largura frontal) e 40 cm (largura transversal), obtendo paramentos com declividades com valores típicos entre 1:10 (H:V) e 1:4 (H:V). A face dos blocos é construída de baixo para cima. Entretanto, os grampos podem ser instalados de cima para baixo. A decisão quanto ao sentido de execução dos

grampos deve ser determinada pelo projetista, de acordo com os resultados de uma análise de estabilidade do talude.

Os blocos pré-moldados são instalados por justaposição sem utilização de argamassa. Esse processo executivo do revestimento da face permite uma racionalização do método executivo, dispensando a utilização de concreto, água e energia elétrica. Muros Terrae é um sistema construtivo de muros de contenção possível graças ao design exclusivo dos blocos, que se encaixam através de saliências sem necessidade de pinos ou conectores. Os blocos são fabricados por meio de prensagem e vibração, resultando em estruturas resistentes e duráveis.

Deve ser executada uma cava para execução da base do muro antes do início da obra, onde serão instaladas as primeiras linhas de blocos. O solo de base deverá possuir boa capacidade de carga, devendo ser evitados aterros não compactados, areias fofas e argilas moles em geral. No fundo da cava, deverá ser executada uma camada de concreto magro com cerca de 5 cm a 10 cm de espessura sobre a qual é assentada a primeira linha de blocos (Figura 28). O assentamento deve ser feito diretamente sobre o concreto recém-lançado.

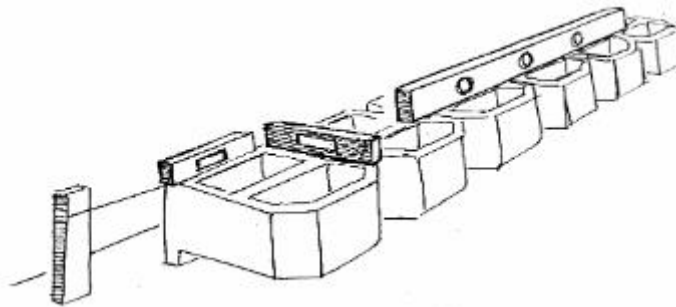


Figura 28 – Posicionamento dos blocos e detalhes do alinhamento e do nivelamento

Após a instalação e o nivelamento da primeira linha de blocos, os vazios da parte posterior dos blocos (junto ao talude) e um espaço de 10 cm entre a parede e a cava deverão ser preenchidos com brita e areia, respectivamente.

O processo executivo do paramento em blocos pré-moldados instalados sem a utilização de argamassa dispensa a execução de dispositivos de drenagem para a saída da água que incide sobre o tardo. Em algumas obras específicas, onde a

presença de água é maior, o projetista deve detalhar dispositivos específicos de drenagem, como drenos profundos.

Cada grampo injetado é conectado ao paramento através da inserção de uma dobra na extremidade da barra (20 cm de comprimento, aproximadamente) dentro do bloco. Os vazios na parte de trás dos blocos, onde estão localizadas as barras dobradas, são preenchidos com concreto com fck maior do que 25MPa. O espaço entre o fundo do bloco e a face da talude também são preenchidos com concreto, solidarizando o grampo ao bloco (Figura 29). A Figura 30 mostra uma escavação de solo grampeado com blocos de concreto na face, em Araras.



Figura 29 – Concretagem e solidarização do grampo no paramento - Muros Terrae



Figura 30 – Solo grampeado em Araras, Petrópolis – Muros Terrae

1.5. Casos de Obra

A escolha da solução de contenção permanente em solo grampeado tem recebido atualmente elevadas aplicações na área urbana imobiliária e industrial. Pitta et al (2007) ilustraram diferentes tipos de acidentes ocorridos em obras de solo grampeado, com o objetivo de entender os principais motivos que levaram esta técnica à ruptura.

A divulgação de acidentes ocorridos em obras executadas para arrimo de terra é muito rara até porque ninguém tem a intenção de divulgar um acidente. Na opinião destes autores, o item de maior relevância dentre as causas para a queda do muro de arrimo é a má execução do chumbador. Os estudos comparam a resistência ao arrancamento a partir de diferentes métodos de injeção. Chumbadores executados com 3 injeções (bainha, 1 fase e 2 fases) mostraram-se mais resistentes. Ao executar uma obra de solo grampeado, o método construtivo deve ser programado detalhadamente e adaptado às condições encontradas no campo. A drenagem geral que abrange a área de contenção deve ser cuidadosamente detalhada, executada e ajustada às condições reais de fluxos de água observados durante a obra. A execução de drenos subhorizontais curtos em áreas de presença do lençol freático, durante o processo de escavação, facilita a injeção de fases e melhora a estabilidade do solo.

1.5.1. Caso do Edifício Astor (Souza et al, 2007)

Entre julho de 2007 e abril de 2008 foi realizada uma obra inédita, usando-se o solo grampeado como técnica de arrimo. Na cidade de Santo André (SP), foi escavado verticalmente subsolo com profundidade entre 3,10 m e 10,35 m, sendo que duas das faces dos taludes escavados são subjacentes a uma estrutura de solo grampeado executada anteriormente. Muitos pesquisadores; consultores e construtores estavam preocupados com o que poderia acontecer com as contenções após os cortes dos chumbadores.

Souza et al (2007) apresentam o histórico das duas obras. Em julho de 2005, foi executada uma contenção de paredes verticais de subsolo para a construção de um prédio comercial na cidade de Santo André (SP), Edifício Astor, localizado na

Rua Monções. projeto geotécnico, de autoria da M. Hosken Consultoria de Fundações e Mecânica de Solos, previa a contenção das escavações verticais. A área escavada verticalmente tem 28,09 m de extensão e profundidade entre 4,42 m e 4,64 m. Conforme especificado em projeto, foram instaladas quatro linhas de chumbadores com inclinação de 10° , cada uma delas com 24 chumbadores, distantes 1,17 m. A primeira linha com 5 m de profundidade, a segunda e terceira com 4 m e a quarta com 3,5 m. A **Error! Reference source not found.** apresenta detalhes da escavação do Edifício Astor.

Foram executadas doze linhas de drenos de paramento, com drenos fibroquímicos, e introduzidos oito drenos sub-horizontais profundos, a 5 m de profundidade, abaixo da última linha de chumbadores. O revestimento final foi feito com uma camada de 7 cm de concreto projetado, tendo como armação fibras sintéticas de polietileno de alta resistência. A **Error! Reference source not found.** mostra fotos da obra finalizada.

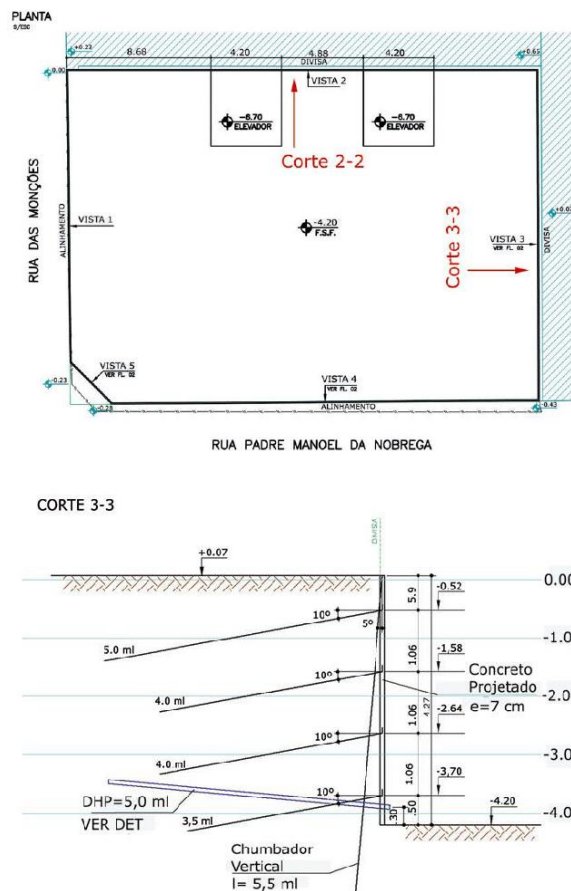


Figura 31 – Detalhes da Estabilização do Ed. Astor (Souza et al, 200



Figura 32 – Término da construção do Ed Astor (Souza et al, 2007)

Em agosto de 2007, os consultores Zirlis e Pitta foram chamados para dar um parecer sobre uma nova obra, vizinha ao Edifício Astor, onde deveriam ser escavadas verticalmente paredes com até 10,35 m de profundidade, onde seria erguido um estabelecimento comercial, o Baby Beef Buffet.

Para realizar a nova obra seria necessário um procedimento até então inédito em obras de contenções por solo grampeado em subsolos de edifícios. Seria necessário cortar os chumbadores da edificação já concluída e fazer a contenção embaixo desta região (**Error! Reference source not found.**).

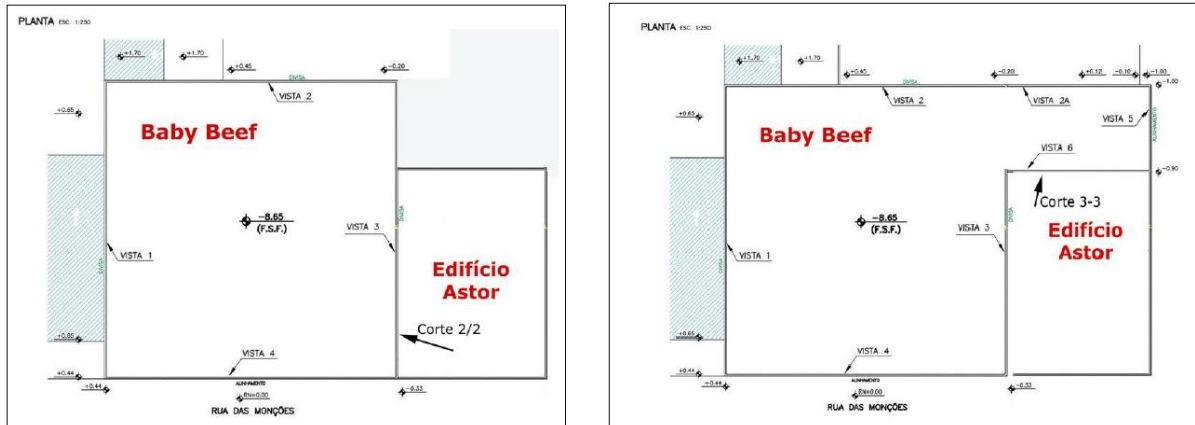


Figura 33 – Detalhes do novo projeto ao lado da construção do Ed Castor

(a) Projeto Inicial (b) Projeto Final

(Souza et al, 2007)

A nova área a ser escavada tinha 28,5 m de extensão e desceu a 9 m de profundidade, ou 4,3 m abaixo da linha escavada no Ed. Astor. Desta forma, foi necessária a colocação de quatro linhas com 23 chumbadores cada, com inclinação horizontal descendente de 10° e profundidades entre 3 m e 5 m, embaixo do Ed. Astor. Foram necessários, ainda, 23 chumbadores verticais a 9,5 m de profundidade e doze drenos de paramento. A Figura 34 mostra o corte das quatro linhas de chumbadores.

Para acompanhar as possíveis deformações durante as escavações, foi instalado um extensômetro com comprimento livre de 6 m. Cabe ressaltar que a execução da obra do Baby Beef não causou repercussão na edificação vizinha. As escavações foram realizadas, as quatro linhas de chumbadores adjacentes foram cortadas, e outras quatro linhas de chumbadores foram instaladas embaixo do Ed. Astor (Figura 35).



Figura 34 – Detalhes da escavação dos grampos da construção do Ed. Astor
(Souza et al, 2007)



Figura 35 – Vista do término da execução da nova estabilização em solo grampeado
(Souza et al, 2007)

Vale enfatizar que a equipe e a empresa responsáveis pela obra possuíam bastante experiência com a técnica de solo grampeado e que sempre realizaram pesquisas na área objetivando o aprimoramento desta técnica, através de ensaios e monitoramento em outras diversas obras.

2. ANÁLISES NUMÉRICAS

2.1. Introdução

A análise numérica foi executada a partir do programa computacional PLAXIS (*Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*) baseado no método dos elementos finitos, e consistiram na reprodução do estudo de caso no Item 3.3, da presente dissertação. Inicialmente, o modelo foi calibrado a partir dos dados da instrumentação de campo, e das previsões numéricas fornecidas por Cundall (1976), a partir do programa FLAC, de diferenças finitas.

Uma vez calibrado o modelo, procedeu-se ao estudo da influência da espessura da face na deformabilidade da escavação em solo grampeado. O presente capítulo apresenta uma breve descrição do programa Plaxis, da metodologia adotada nas análises numéricas, e do caso analisado.

2.2. Programa Plaxis

O programa Plaxis começou a ser desenvolvido em 1987 na Universidade Técnica de Delft (Holanda) e foi elaborado com o intuito de constituir uma ferramenta prática para uso de engenheiros em análises geotécnicas. Sua estrutura computacional está dividida em 4 subprogramas: sub-rotina de entrada de dados (*Input*); cálculo (*Calculate*); saída de dados (*Output*) e edição de curvas (*Curves*).

Na sub-rotina de entrada de dados, são introduzidos os dados do problema, como geometria, parâmetros dos materiais, disposição dos elementos, modelos constitutivos, deslocamentos prescritos, e condições de contorno. O processo de geração da malha é automático, sendo a geometria dividida em elementos triangulares isoparamétricos de seis ou quinze nós. A precisão dos resultados depende da forma e dimensões da malha que representa o modelo. Malhas mais refinadas tendem a resultados mais acurados, mas demandam também maior esforço computacional. Por isso, o programa permite refinamento global ou local (em regiões de maior interesse).

O software possui 5 modelos constitutivos para representação do comportamento dos solos. Na presente dissertação, os solos escavados foram reproduzidos a partir do elastoplástico, com critério de resistência de Mohr-Coulomb.

O modelo constitutivo Mohr-Coulomb integra a categoria dos modelos elastoplásticos. O princípio básico da elastoplasticidade define que as deformações são decompostas em duas parcelas: elástica e plástica. No comportamento elástico, as deformações são recuperadas, ou seja, são reversíveis, enquanto a plasticidade está associada ao desenvolvimento de deformações irreversíveis.

O modelo Mohr-Coulomb é um modelo elástico perfeitamente plástico, empregado para representar a ruptura por cisalhamento de solos e rochas. Este modelo é assim designado, devido à hipótese de que o material se comporta como linear elástico até atingir a ruptura, definida pela envoltória de Mohr-Coulomb; ou seja, o material apresenta um comportamento linear elástico até atingir uma determinada tensão de escoamento, que se mantém constante com o acréscimo de deformações plásticas (Brinkgreve, 2002). Para a representação de um material a partir do modelo de Mohr Coulomb, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros: γ_{sat} (peso específico saturado), γ_d (peso específico seco), ϕ' (ângulo de atrito efetivo), c' (coesão efetiva), k_x (permeabilidade horizontal), k_y (permeabilidade vertical), E (módulo de deformabilidade), ν (coeficiente de Poisson).

Ressalta-se que o programa não possui elemento específico para representar o grampo. Existem alguns elementos geométricos que podem ser utilizados, como por exemplo, elementos de barra.

Os elementos de barra permitem a modelagem de estruturas esbeltas, que apresentam rigidez à flexão e axial. Os parâmetros representativos dos elementos de barra são: módulo de rigidez à flexão (EI), rigidez axial (EA) e coeficiente de Poisson (ν). No caso de interfaces solo-elemento, o programa disponibiliza um elemento característico (elemento de interface) cujas propriedades são estimadas a partir da resistência do solo, através das equações:

$$c_{inter} = R_{inter} \cdot c_{solo} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\tan \phi_{inter} = R_{inter} \cdot \tan \phi_{solo} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: R representa o fator de redução de resistência nas interfaces. More (2003) sugere valores de R entre 0,50 e 1,00, dependendo do tipo de solo e do tipo de material do elemento em contato. Para as análises executadas no presente trabalho, foi adotado um fator de redução de 0,90.

Como comentado anteriormente, foi realizado um estudo para avaliar a influência da espessura da face na deformabilidade da escavação grampeada.

A face foi reproduzida de duas formas distintas:

- Introdução de uma camada de concreto na face, com diferentes espessuras;
- Simulação da face com um elemento de barra de concreto, com características geométricas representativas das diferentes espessuras adotadas.

Os parâmetros adotados para a representação dos solos, dos grampos e da face estão apresentados no Item 3.4.

2.3. Caso Analisado

A presente dissertação apresenta a análise numérica de uma escavação grampeada, executada em Hong Kong. Em 1993, fez-se necessária a execução de uma escavação no pé de uma encosta natural para a construção de uma grande estação de bombeamento. Para tanto, foi executado um corte íngreme (80°) de 13,50 m de altura para a realização da obra (Wong et al, 1997). A geologia da área compreende uma camada de granito completamente decomposto, que recobre uma camada de granito moderadamente decomposto, com profundidades de 12 m e 20 m, sendo a escavação realizada no trecho de granito completamente decomposto.

Os grampos, com comprimentos entre 6 m e 11 m, foram inseridos com espaçamentos horizontal e vertical de 1,0 m e 1,5 m, respectivamente. Os grampos foram executados com inclinações de 10° com a horizontal, e as barras de aço galvanizado possuíam diâmetros de 32 mm ou 40 mm. Para o revestimento da face, foi executado um concreto projetado reforçado com camada de tela de aço com 10 cm de espessura.

A escavação grampeada foi instrumentada com inclinômetros e extensômetros, para o acompanhamento dos deslocamentos horizontais e das cargas nos grampos, respectivamente, no período compreendido entre Abril de 1993 e Julho de 1994.

A instrumentação forneceu deslocamentos horizontais máximos da ordem de 13 mm, no topo da escavação, ao final do processo executivo. O máximo esforço de tração medido nos grampos foi de 39,95 kN.

Wong et al (1997) confrontaram os deslocamentos horizontais e os esforços nos grampos medidos com os previstos a partir do programa FLAC. Todos os resultados serão apresentados e discutidos nos Capítulos 3 e 4 do presente trabalho.

A seção mais crítica do solo grampeado foi ilustrada na Figura 36. Os grampos das linhas 1 a 4 possuem 10 m de comprimento. As outras linhas são formadas por grampos de 11 m. Os grampos foram executados com inclinações de 10° com a horizontal, e as barras de aço galvanizado possuíam diâmetros de 32 mm ou 40 mm.

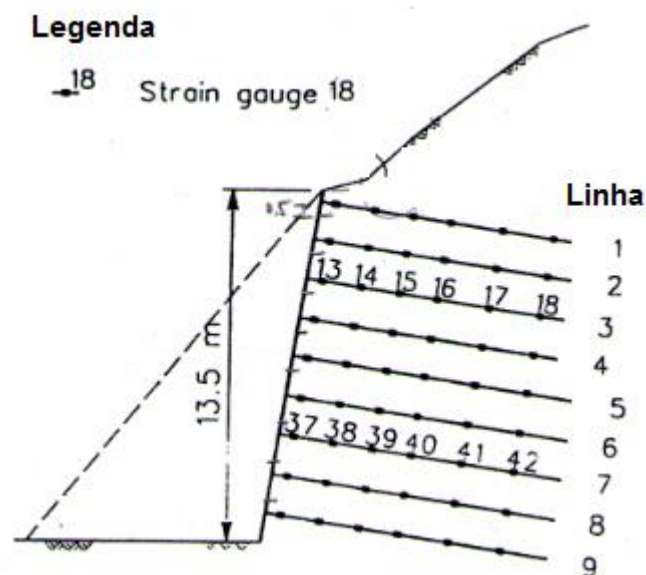


Figura 36 – Seção crítica: solo grampeado Hong Kong (Wong et al, 1997)

A escavação em solo grampeado foi instrumentada, para monitoramento dos deslocamentos horizontais e carga nos grampos. A instrumentação consistiu em:

- **Inclinometria:** Um inclinômetro foi instalado na parte mais crítica da encosta grampeada para acompanhamento dos deslocamentos horizontais durante e após a construção. O inclinômetro foi instalado a um metro da crista do talude. As leituras foram realizadas em intervalos semanais durante e após a obra. A Figura 37 ilustra o posicionamento do inclinômetro.

- **Extensometria:** Na seção mais crítica da encosta, 9 grampos foram instrumentados para medida da distribuição das cargas nos mesmos. Ao longo de cada grampo, 6 extensômetros foram instalados na barra de aço (Figura 36). Os momentos fletores não puderam ser medidos em função da geometria de instalação dos extensômetros. As leituras foram realizadas semanalmente durante todo o período de monitoramento.

Cabe ressaltar que a instrumentação foi instalada para monitorar o desempenho da escavação grampeada, antes e após a execução. O monitoramento foi realizado no período de Abril de 1993 a Julho de 1994. Na ocasião, foi realizada uma modelagem numérica com o programa FLAC, de diferenças finitas. Os resultados desta modelagem também serão apresentados e comparados no presente trabalho.

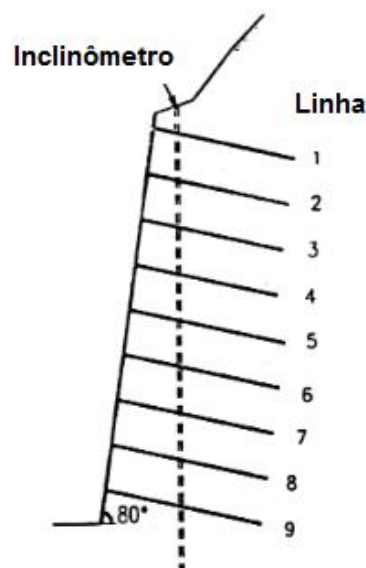


Figura 37 – Posicionamento do inclinômetro (Wong et al, 1997)

2.4. Metodologia Adotada

A geometria adotada nas análises numéricas está apresentada na Figura 38, e foi elaborada com base na seção apresentada na Figura 36. Observa-se que a escavação foi totalmente realizada na região onde o granito encontrava-se completamente decomposto.

Em uma etapa preliminar, foi feita uma avaliação da influência da distância das condições de contorno (restrição de deslocamento horizontais e/ou verticais) nas deformações previstas, chegando-se a uma geometria ótima.

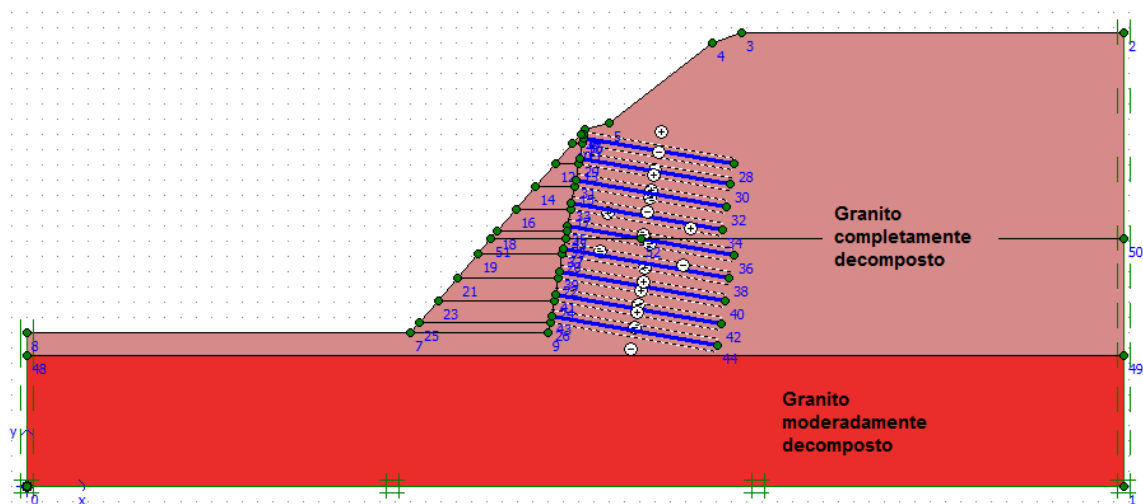


Figura 38 – Geometria adotada nas análises

Os materiais envolvidos (granito completamente e moderadamente decomposto) foram representados pelo modelo elastoplástico, com critério de resistência de Mohr Coulomb. Os parâmetros adotados estão apresentados na Tabela 3. Os parâmetros coesão e ângulo de atrito do material granito totalmente decomposto foram obtidos através da investigação geotécnica detalhada realizada na obra e descrito por Wong et al. (1997), enquanto os outros parâmetros foram obtidos através de uma pesquisa realizada para construção de um túnel em solos residuais de granito, na cidade de Porto, Portugal. O local apresentava as mesmas características que o caso analisado nesta pesquisa: solo residual de granito (granito totalmente decomposto) situado acima de uma camada de granito moderadamente

decomposto. Ensaio de prospecção foram realizados para determinação destes parâmetros geotécnicos.

Tabela 3 – Parâmetros Geotécnicos adotados nas análises

Material	Peso específico γ (kN/m ³)	Módulo de deformabilidade E (MPa)	Coefficiente de Poisson ν	Coesão c (kPa)	Ângulo de Atrito ϕ (°)
Granito totalmente decomposto	19,0	60	0,30	16,0	37
Granito moderadamente decomposto	25,0	6.000	0,20	20,0	37

Para a representação do grampo, foi utilizado o elemento de barra, com os parâmetros listados na Tabela 4. Esses parâmetros foram definidos com base na rigidez à flexão (EI) e rigidez axial (EA), onde o momento de inércia do grampo e a área são definidos como:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

Eq. 3

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Eq. 4

I = momento de inércia da barra de aço

d = diâmetro da barra de aço

A = Seção da barra de aço

De forma a avaliar a influência da espessura do paramento nas deformações da escavação, procedeu-se à análise com 3 diferentes valores de espessura. O paramento foi simulado por um elemento de barra de concreto, com rigidez axial e à flexão. Os parâmetros correspondentes às 3 diferentes espessuras da face estão reunidos na Tabela 5.

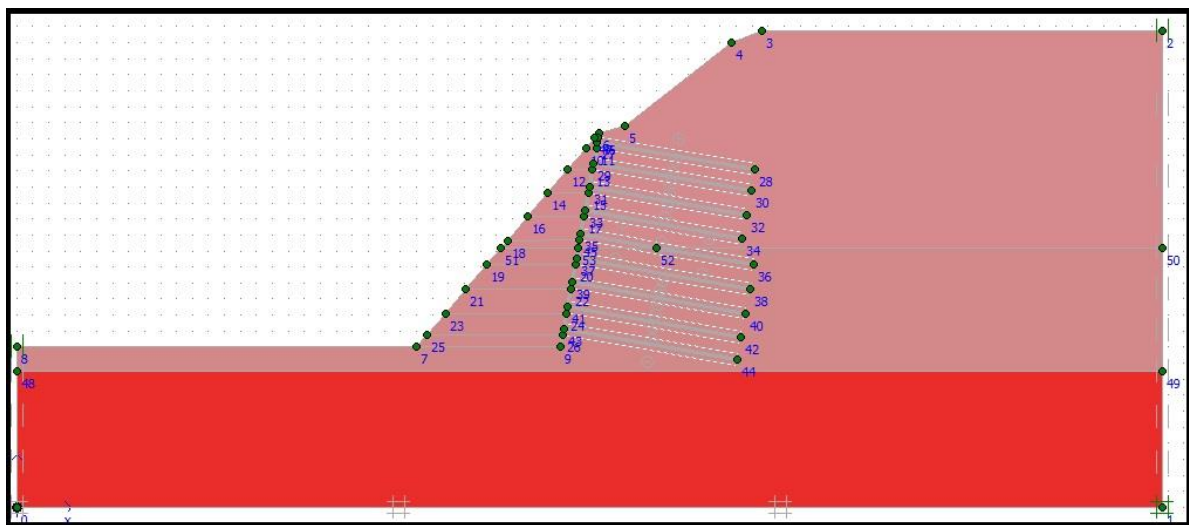
Tabela 4 – Parâmetros do grampo

Diâmetro da Barra (mm)	E (MPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)
32,00	210.000	0,33	168.806,40	10,80

Tabela 5 – Parâmetros adotados na simulação da face

Espessura da Parede (cm)	E (MPa)	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)
10,0	25.000	2.500.000,00	8.333,33
15,0	25.000	3.750.000,00	28.125,00
20,0	25.000	5.000.000,00	66.666,67

As análises numéricas procuraram reproduzir fielmente as etapas de escavação e instalação dos grampos. O programa Plaxis permite inserir, na fase de cálculo, as diferentes etapas de escavação, a ativação dos grampos e da interface solo-grampo, e a ativação da parede, em tempos pré-definidos. A Figura 39 apresenta a condição inicial introduzida nas análises numéricas, antes da execução das etapas de escavação e ativação dos grampos.

**Figura 39 – Condição Inicial**

A Tabela 6 apresenta as diferentes fases de cálculo inseridas no programa. É interessante notar que as fases de escavação ocorreram em períodos distintos de execução. Nas fases 2 e 3, foram realizadas escavações de 3 trechos com respectiva instalação dos grampos e execução do revestimento da face. Nas demais fases, procedeu-se a uma etapa de escavação apenas. A Figura 40 a Figura 44 apresentam a simulação do processo executivo, com as diferentes etapas introduzidas no Plaxis.

Tabela 6 – Etapas de Cálculo

Etapas de Calculo		
Fase	Processo Executivo	Tempo de execução ate inicio da fase posterior
Fase 01 (Figura 40)	Primeira etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 01	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas
Fase 02 (Figura 41)	Segunda etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 02	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas
	Terceira etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 03	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas
	Quarta etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 04	24 horas
Execução do revestimento da face	24 horas	
Fase 03 (Figura 42)	Quinta etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 05	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas
	Sexta etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 06	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas
	Setima etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 07	24 horas
Execução do revestimento da face	24 horas	
Fase 04 (Figura 43)	Oitava etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 08	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas
Fase 05 (Figura 44)	Nona etapa de escavação	24 horas
	Instalação do grampo 09	24 horas
	Execução do revestimento da face	24 horas

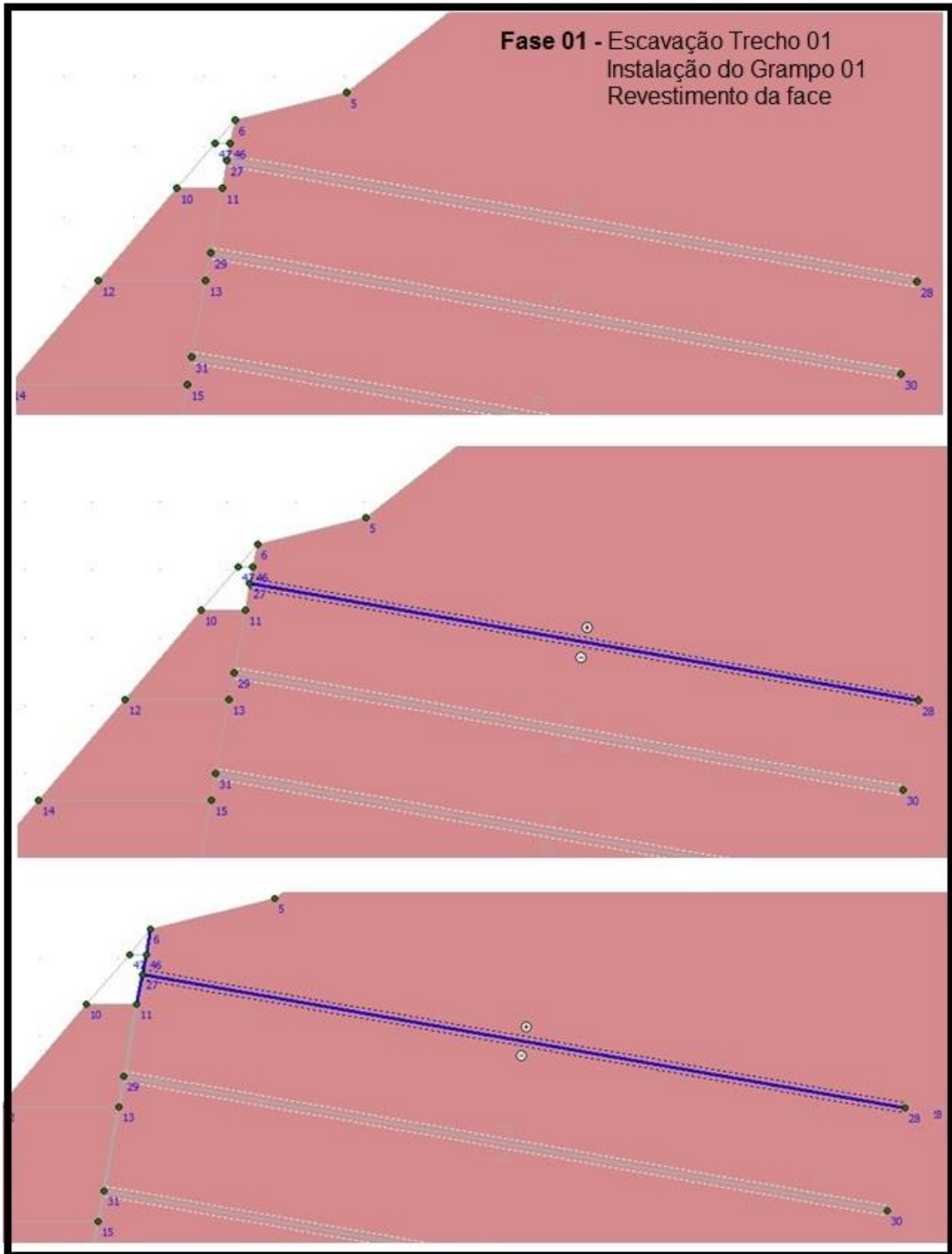


Figura 40 – 1ª Fase de execução

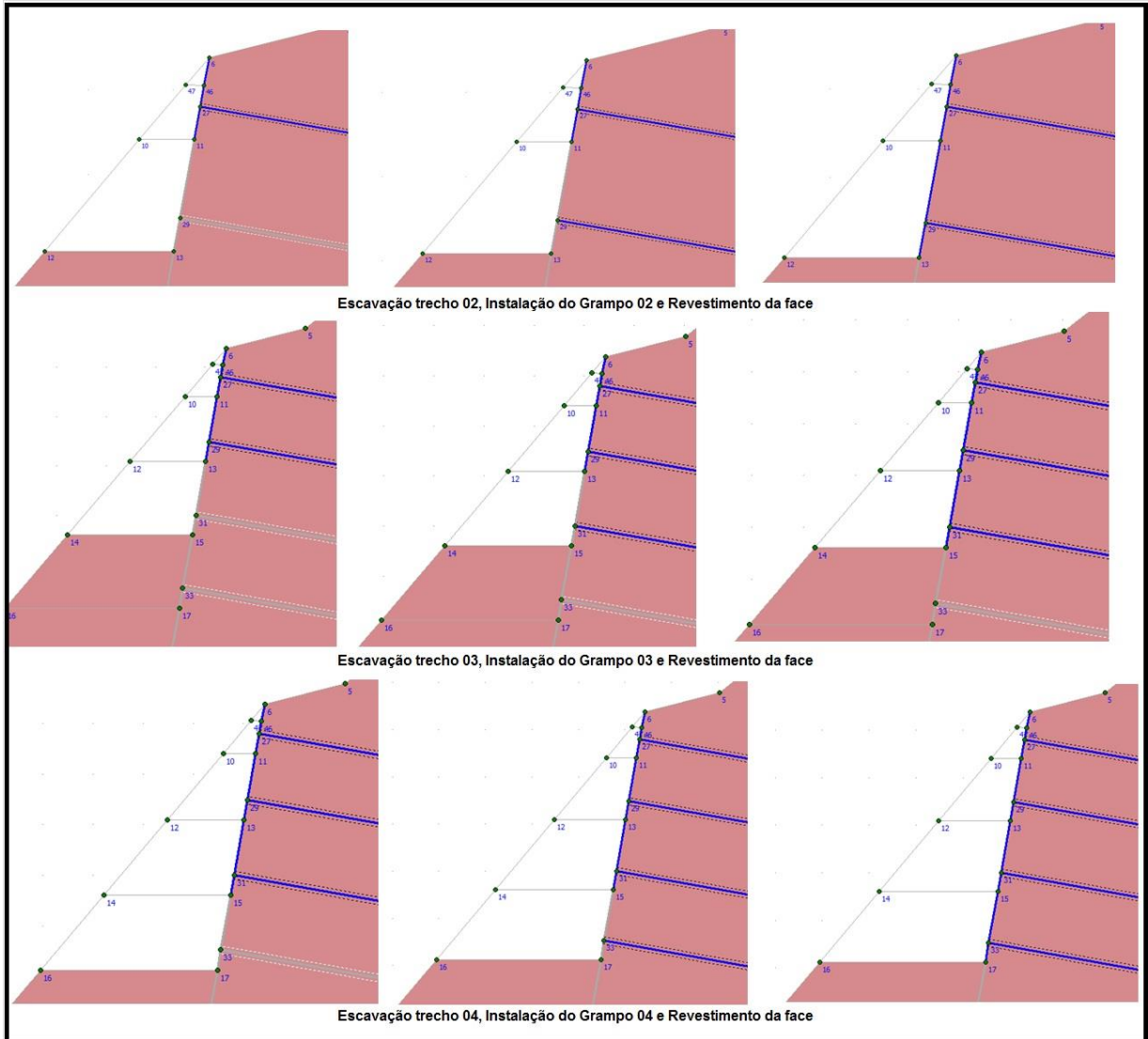


Figura 41 – 2ª Fase de execução

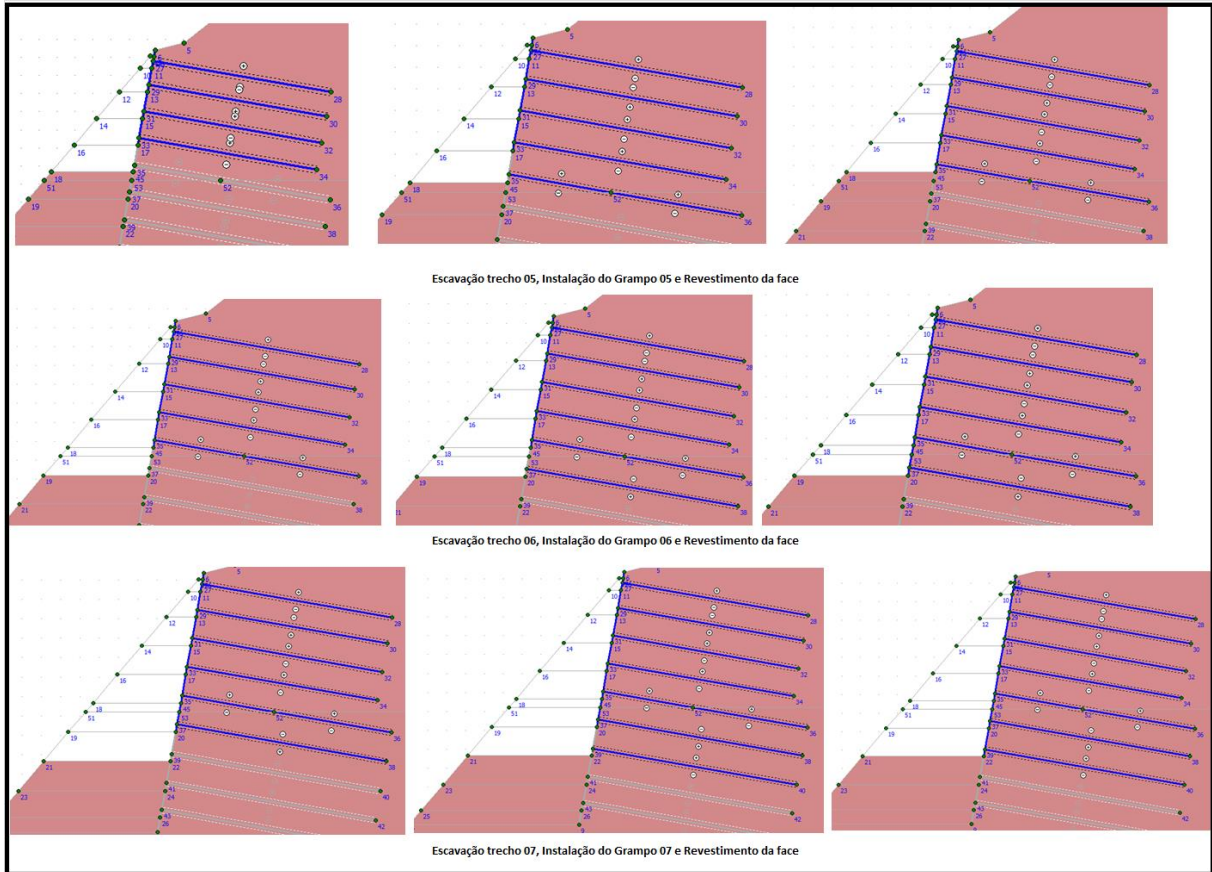


Figura 42 – 3ª Fase de execução

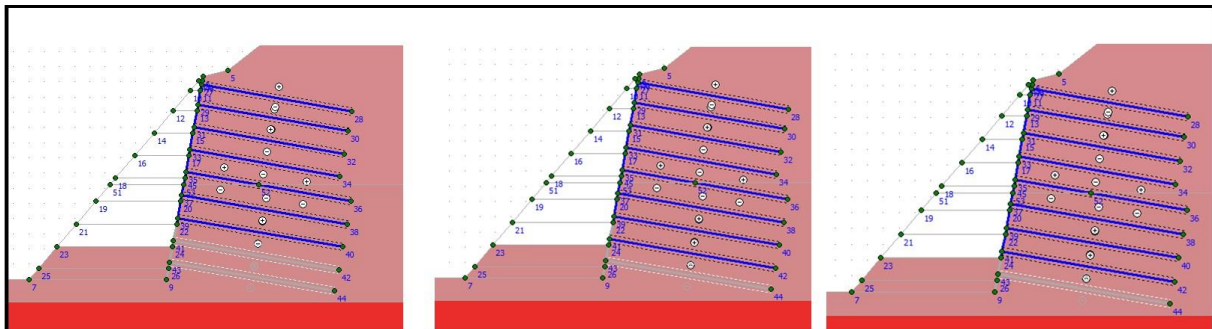


Figura 43 – 4ª Fase de execução

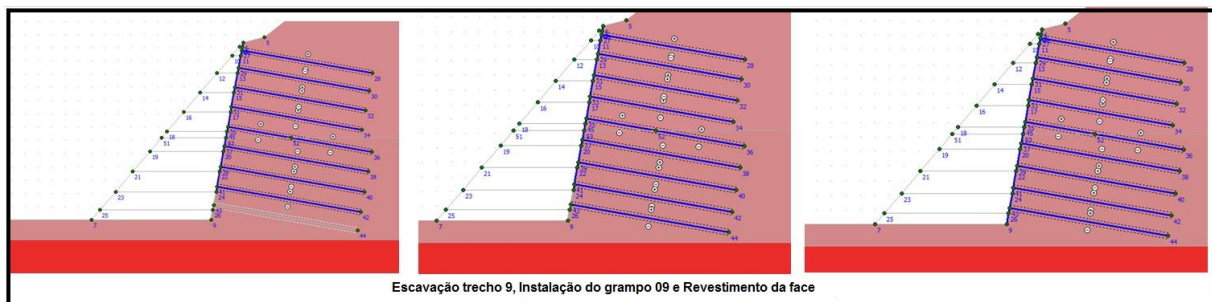


Figura 44 – 5ª Fase de execução

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta a simulação numérica do processo executivo da escavação realizada em Hong Kong, e também reproduzida numericamente por Wong et al (1997).

Uma vez reproduzido o comportamento da escavação, fornecido pela instrumentação de campo, procedeu-se à análise da influência de fatores como: espessura da face, velocidade de escavação, travamento da face, e processo executivo na deformabilidade da escavação.

3.1. Reprodução do processo executivo

3.1.1. Deslocamentos Horizontais

A Figura 45 a Figura 49 confrontam os deslocamentos horizontais medidos e previstos numericamente, nas diferentes etapas de escavação. Nestas Figuras, também são apresentados os deslocamentos horizontais previstos numericamente pelo programa FLAC. Nesta análise, foi considerada a espessura real da parede, igual a 10 cm.

Os resultados mostram que na primeira fase de escavação, a instrumentação fornece valores de deslocamentos horizontais praticamente nulos, enquanto as previsões numéricas com o programa Plaxis fornecem valores máximos de 9,0 mm. À medida que a escavação prossegue, os resultados medidos e previstos se aproximam em termos de deslocamentos horizontais máximos. No monitoramento de campo, os deslocamentos máximos foram de 12,5 mm, enquanto na análise numérica (Plaxis), o deslocamento horizontal máximo foi de 10,1 mm. A

Tabela 7 compara os deslocamentos horizontais máximos previstos numericamente pelos diferentes programas e os fornecidos pela instrumentação, nas diferentes fases de escavação. A Figura 50 mostra os vetores de deslocamentos horizontais fornecidos pela análise numérica, ao final da escavação.

É interessante notar que as análises executadas com o programa FLAC forneceram deslocamentos horizontais superiores, apesar de terem sido adotados os mesmos modelos constitutivos. Cabe ressaltar, que a modelagem realizada anteriormente com o FLAC não considerou a maior rigidez do solo de fundação, fato que justifica a existência de deslocamentos horizontais abaixo da profundidade onde a escavação foi realizada (abaixo dos 15 m de profundidade) e o programa PLAXIS força um deslocamento na fase inicial, comportamento este não observado na instrumentação (Figura 45).

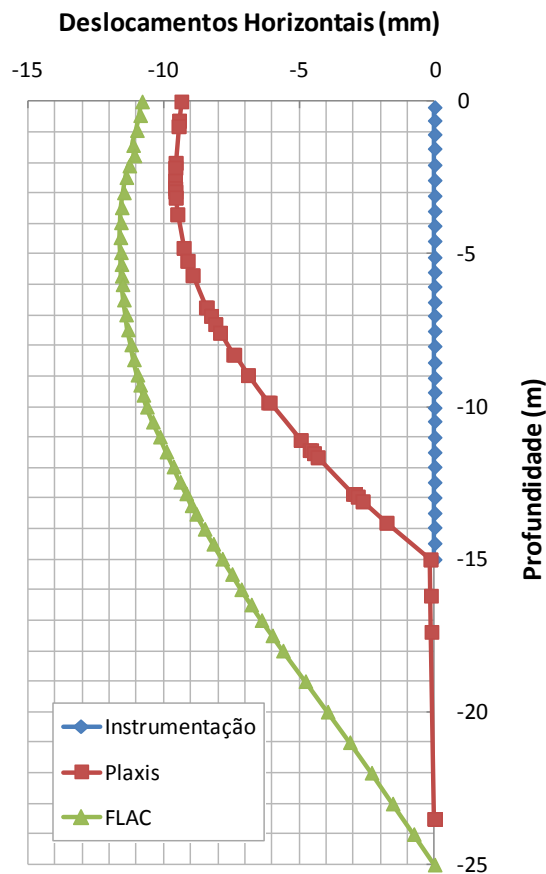


Figura 45 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 01

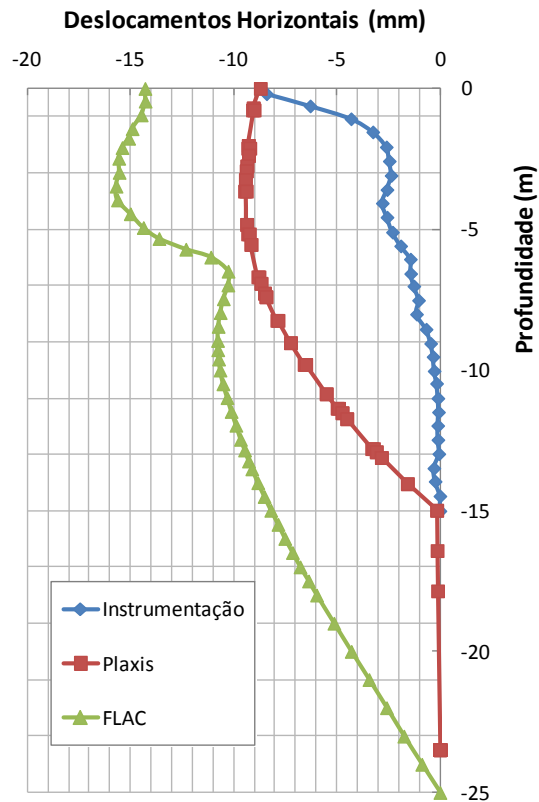


Figura 46 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 02

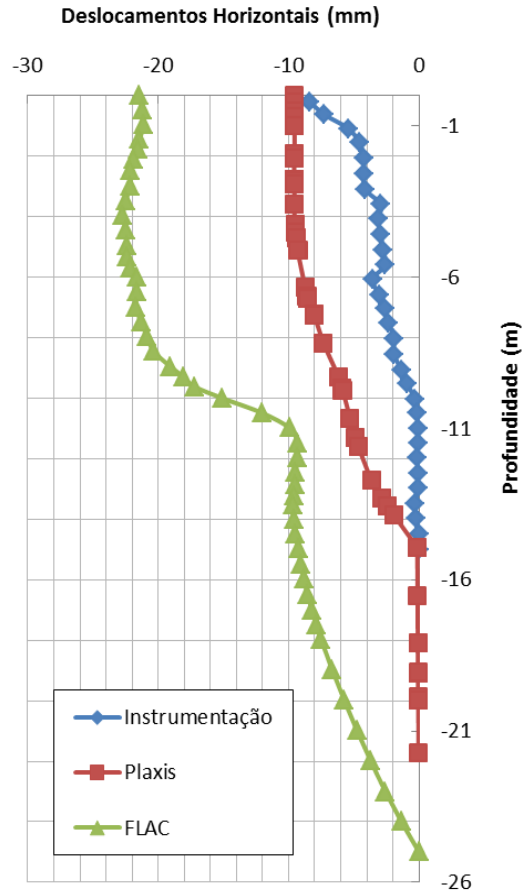


Figura 47 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 03

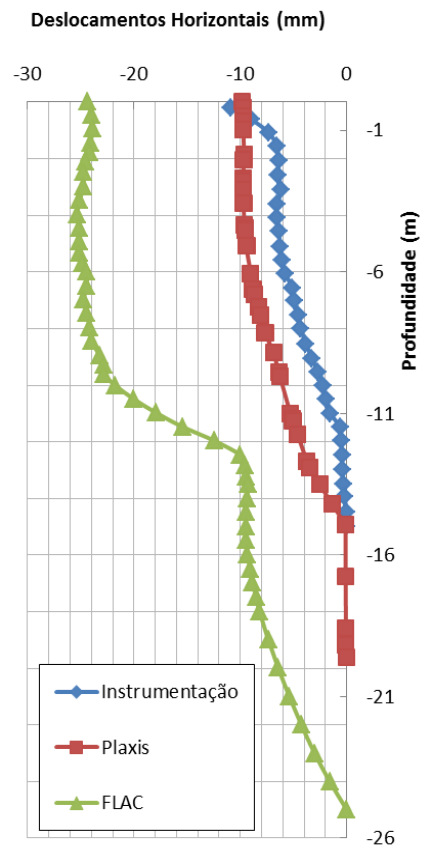


Figura 48 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 04

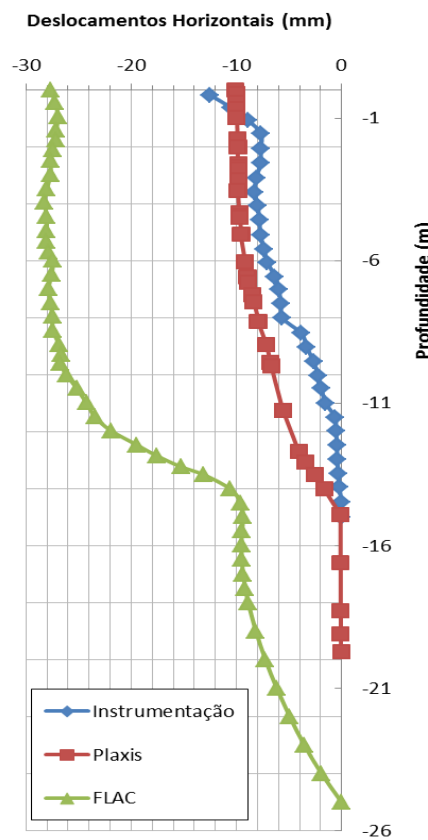
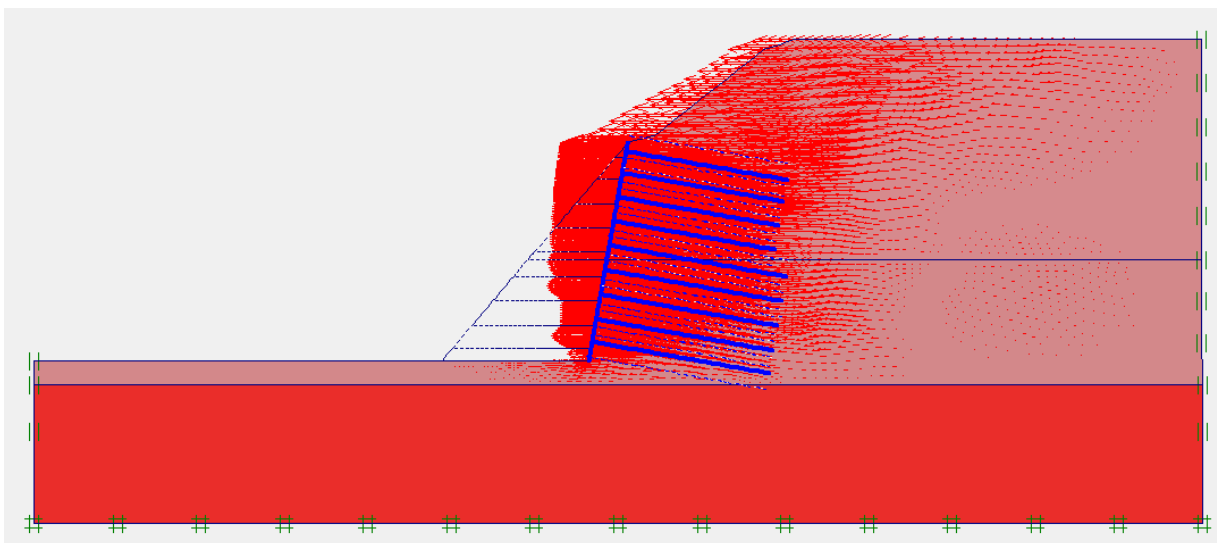


Figura 49 - Deslocamentos horizontais previstos e medidos: Fase 05

Tabela 7 – Deslocamentos horizontais máximos previstos e medidos

Etapa de Escavação	Deslocamentos horizontais máximos (mm)		
	Plaxis	FLAC	Inclinômetro
01	9,0	11,6	0
02	9,4	15,7	8,4
03	9,6	22,7	8,4
04	9,8	25,3	10,9
05	10,1	28,2	12,5

**Figura 50** – Vetores de deslocamentos horizontais: Final da escavação

3.1.2. Esforços nos grampos

Com o objetivo de avaliar os esforços máximos nos grampos, também foi realizada uma comparação entre os dados fornecidos pela instrumentação e os valores previstos através da análise numérica. A Figura 51 apresenta a distribuição dos esforços nos grampos das linhas 3 e 7, em diferentes fases de execução. A

Tabela 8 reúne os valores dos esforços previstos numericamente, e a Figura 52 mostra como foram obtidos esses esforços no Plaxis.

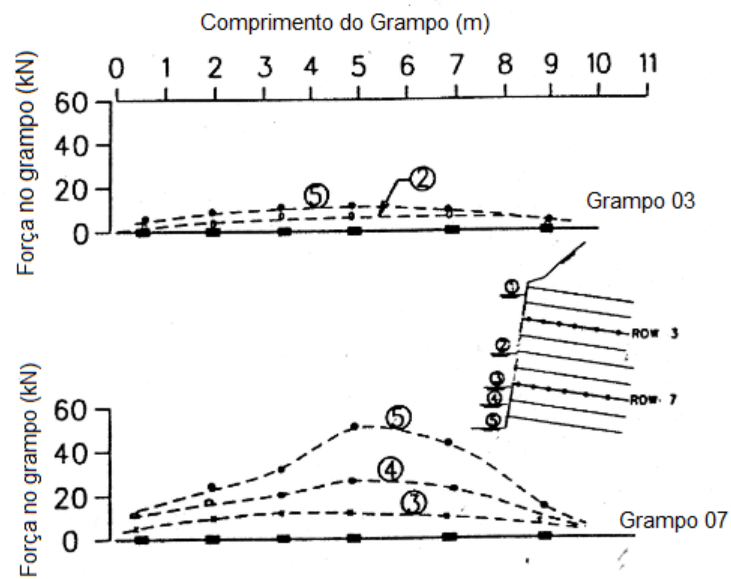


Figura 51 – Extensometria dos grampos 03 e 07 em diferentes fases de execução

Tabela 8 – Esforços máximos obtidos no Plaxis

	Fase de Execução	Força no grampo (kN)
Grampo 03	2	3,33
	5	9,05
Grampo 07	3	4,56
	4	26,07
	5	39,95

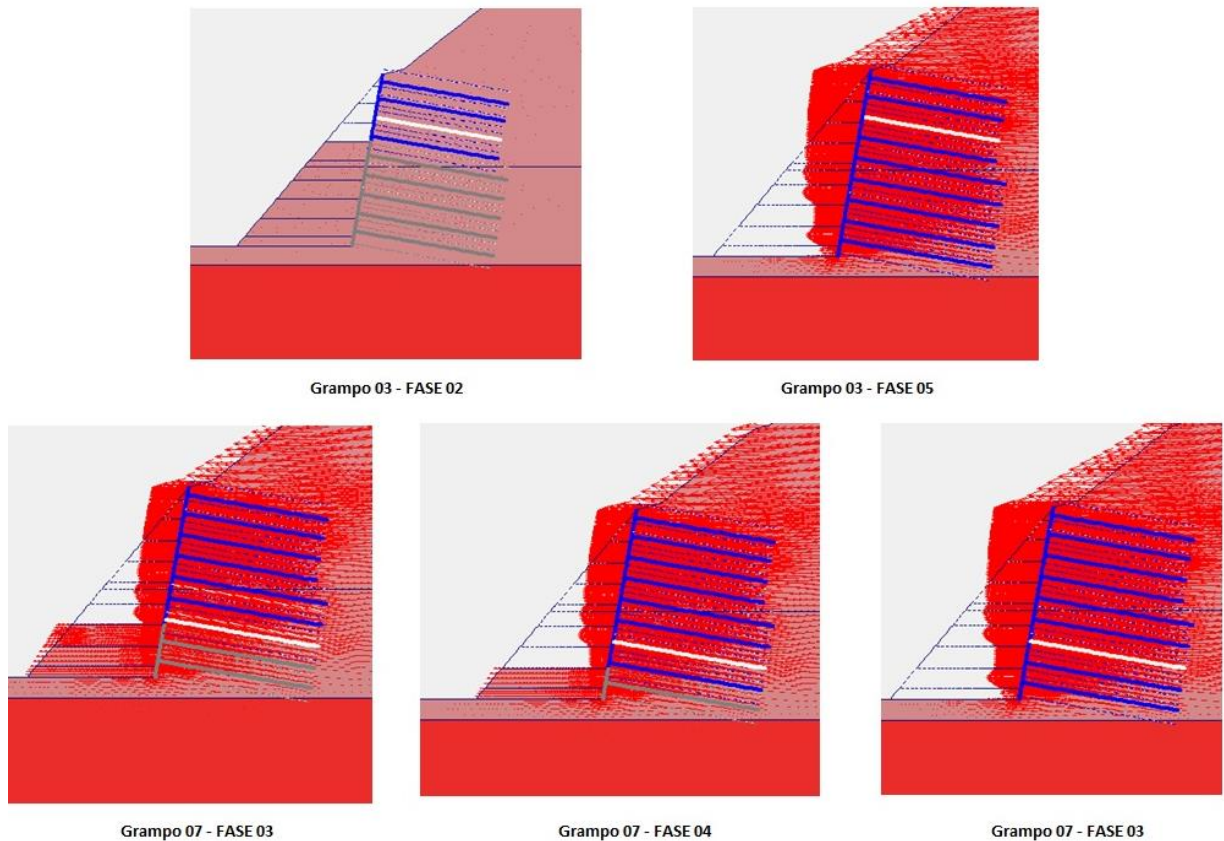


Figura 52 – Obtenção dos esforços no Plaxis

De maneira a analisar a distribuição das forças máximas nos grampos ao longo da profundidade, a força em cada nível de escavação/installação do grampo foi representada como um parâmetro adimensional F_n na profundidade relativa z/H , onde:

$$F_n = \frac{T_{max}}{\gamma \times H \times S_v \times S_h}$$

Eq. 5

Onde: $T_{m\acute{a}x}$ = esforço máximo no grampo

γ = peso específico

S_v e S_h = espaçamento vertical e horizontal, respectivamente.

A Tabela 9 reúne os valores de esforços máximos obtidos ao longo da profundidade, no final da escavação. Para obtenção da força normalizada, foram adotados os parâmetros listados na Tabela 10.

A Figura 53 confronta os esforços previstos numericamente com os fornecidos pela extensometria, em termos de forças e profundidade normalizadas. Observa-se que os esforços variam com a profundidade, com um crescimento praticamente linear no trecho central (em ambos os casos). Em alguns pontos, os esforços medidos e previstos foram coincidentes, indicando uma boa confiabilidade dos resultados numéricos.

Tabela 9 – Esforços máximos previstos numericamente ao final da escavação

Modelagem - Plaxis			
z	z/H	Tmax (kN)	Força Normalizada
0,589	0,0436	25,41	0,0660
1,912	0,1416	12,85	0,0334
3,406	0,2523	9,05	0,0235
4,893	0,3624	15,75	0,0409
6,421	0,4756	30,26	0,0786
7,888	0,5843	48,65	0,1264
9,447	0,6998	39,95	0,1038
10,823	0,8017	90,85	0,2361
12,29	0,9104	38,33	0,0996

Tabela 10 – Parâmetros adotados para obtenção da força normalizada

Altura da Escavação (m)	Peso específico (kN/m³)	Espaçamento horizontal (m)	Espaçamento Vertical (m)
13,50	19,0	1,00	1,50

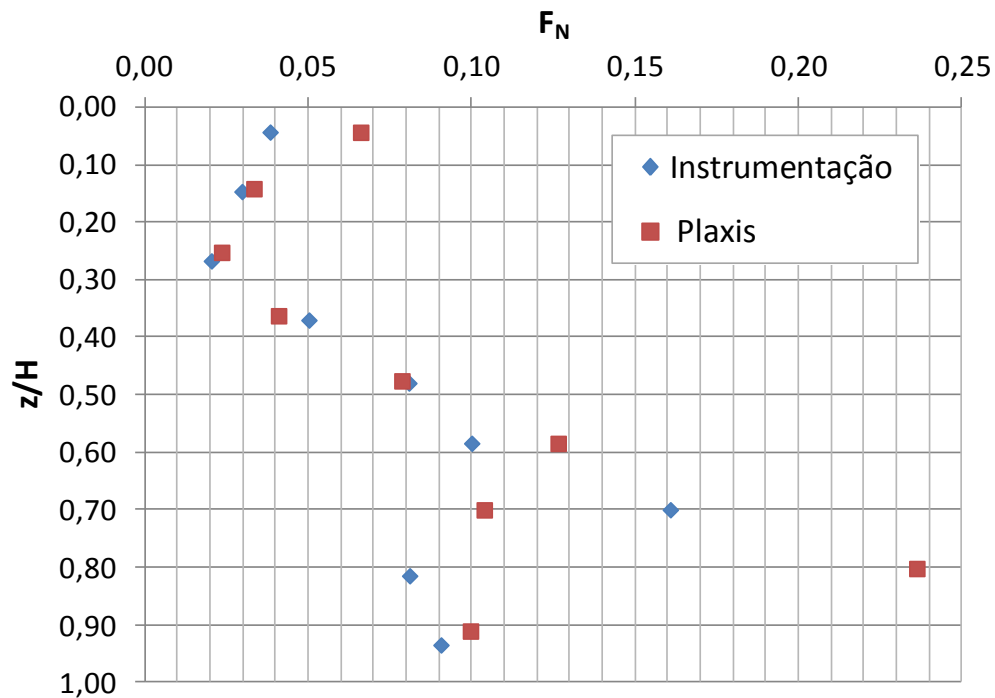


Figura 53 – Distribuição da força normalizada: Plaxis x Extensometria

De um modo geral, os resultados sugerem que os parâmetros adotados, bem como os modelos constitutivos representativos dos diferentes materiais e elementos estruturais reproduziram o comportamento da escavação grampeada.

3.2. Influência da espessura do paramento

Antes de proceder à avaliação da influência da espessura do paramento, foram executadas análises com diferentes formas de representação da face. A primeira análise consistiu na introdução de uma face, com espessura de 10 cm, e parâmetros representativos do concreto, como mostra a Figura 54.

Na segunda análise, a face foi representada por um elemento de barra de concreto, com parâmetros geométricos que conduzem a uma espessura de 10 cm (Figura 55), e peso específico do concreto.

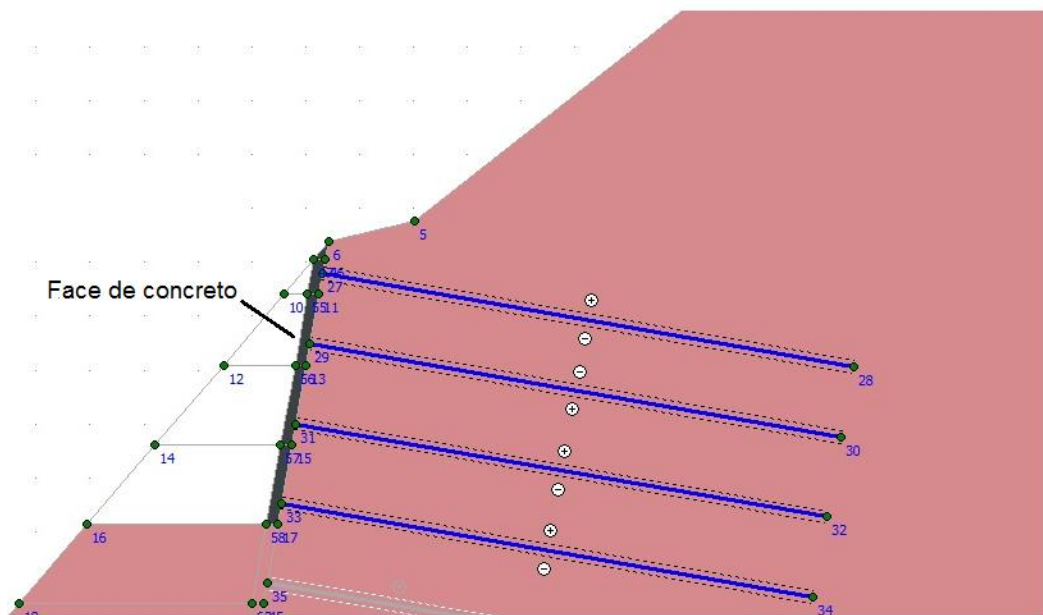


Figura 54 – Alternativa 1 para representação da face

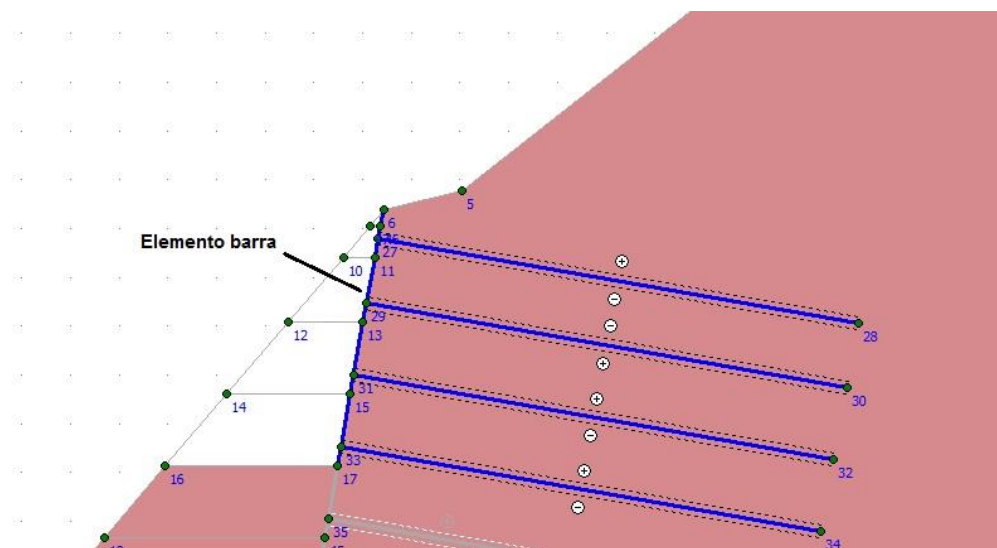


Figura 55 – Alternativa 2 para representação da face

A Figura 56 compara os resultados fornecidos pelo inclinômetro com os resultados previstos a partir das diferentes alternativas de representação da face. Pode-se observar que a adoção de elementos de barra conduz a deslocamentos horizontais previstos mais próximos das condições de campo. A representação da face como um material, com espessura de 10 cm, e parâmetros representativos do concreto fornece valores de deslocamentos horizontais superiores.

Desta forma, a análise da influência da espessura da parede foi realizada a partir da introdução de elementos de barra na simulação da face de concreto. As análises consideraram espessuras de parede de 10 cm, 15 cm e 20 cm.

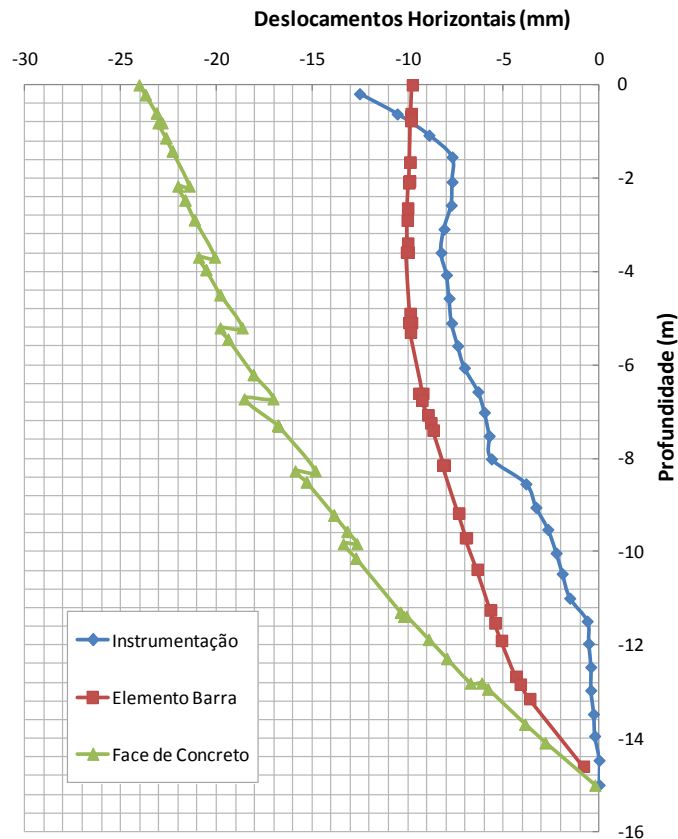


Figura 56 – Comparação entre os diferentes tipos de representação da face

A Figura 57 compara os deslocamentos horizontais previstos considerando as diferentes espessuras da face. Pode-se observar que os valores de deslocamentos horizontais máximos para revestimento de concreto com 10 cm, 15 cm e 20 cm, definidos como elementos de barra, foram de 10,1 mm, 10,0 mm e 9,8 mm, respectivamente. Essas diferenças não são significativas para efeitos práticos. Os resultados mostraram-se coerentes, uma vez que a face não apresenta função de minoração da deformabilidade da estrutura.

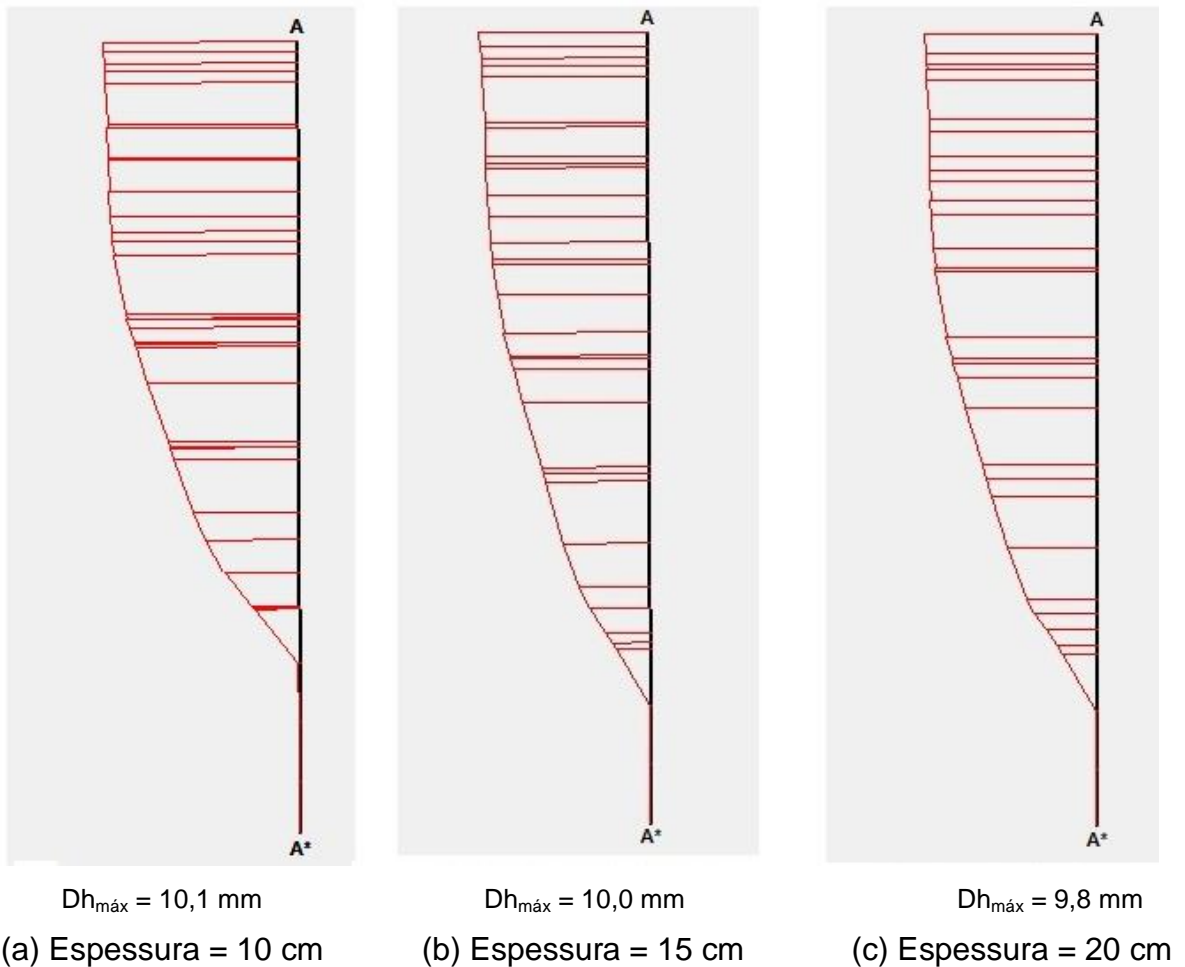


Figura 57 – Deslocamentos horizontais previstos: paredes com diferentes espessuras

As análises iniciais foram direcionadas para a espessura do revestimento executado na obra (10 cm) e a influência do aumento da seção do revestimento na magnitude dos deslocamentos. Para isso, foram analisadas também espessuras com 15 cm e 20 cm. Posteriormente, outras modelagens foram realizadas para avaliação do revestimento da face com espessuras inferiores à executada, de acordo com as espessuras comumente utilizadas nas obras de concreto projetado. O abatimento adequado do concreto projetado via úmida deve variar entre 7,0 cm e 15,0 cm sendo executado em sucessivas camadas de aproximadamente 50 mm cada, enquanto para via seca são executadas camadas com até 10,0 cm (Revista Técnica). Neste caso, foi feito um estudo com espessuras de 6 cm, 7 cm e 8 cm.

Os resultados apresentados na Figura 58 mostram que a adoção de espessuras entre 6 cm e 8 cm não produz diferenças nas deformações horizontais

na estrutura, sugerindo, como esperado, que o revestimento da face não possui função estrutural.

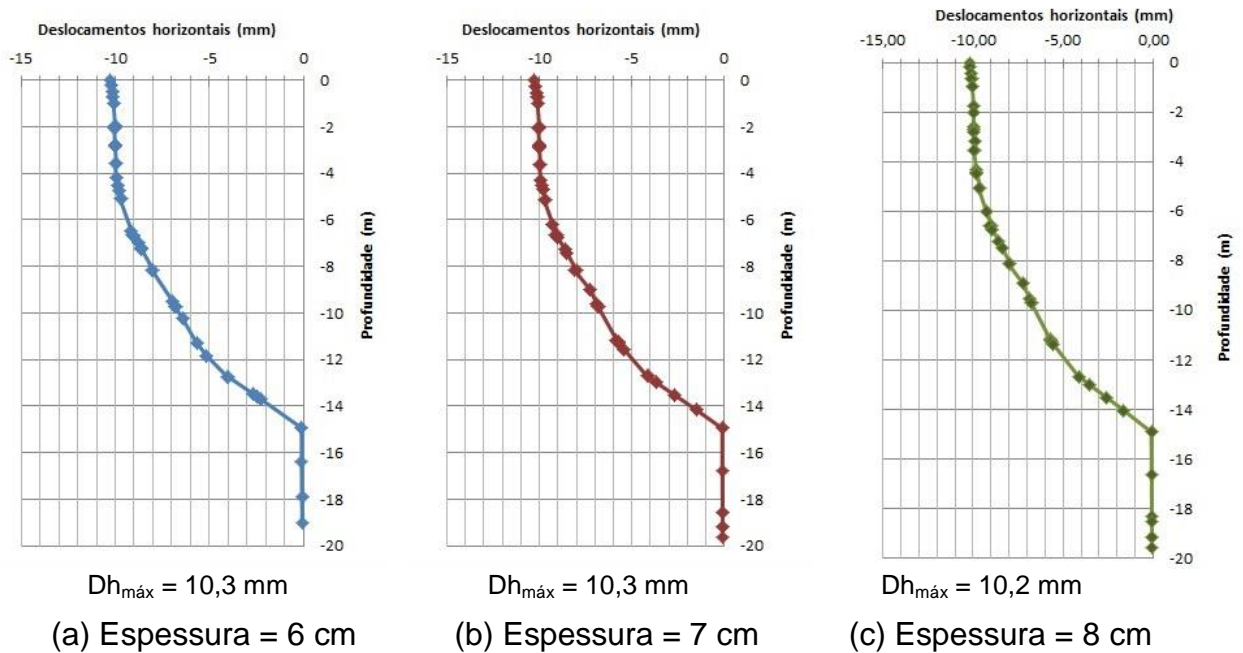


Figura 58 – Deslocamentos horizontais previstos: paredes com espessuras < 10 cm

A Tabela 11 resume os valores de deslocamentos horizontais máximos obtidos na presente dissertação, para diferentes valores de espessura da face. Através deste estudo, pode-se confirmar que o aumento da espessura possui pouca influência nos valores dos deslocamentos horizontais máximos. O revestimento da face é responsável pela estabilização de possíveis rupturas pontuais, não influenciando de forma significativa nos valores de deformação.

Tabela 11 – Deslocamentos máximos previstos para diferentes espessuras da face

Espessura do Revestimento (cm)	Deslocamentos máximos (mm)
6,0	10,3
7,0	10,3
8,0	10,2
10,0	10,1
15,0	10,0
20,0	9,8

3.3. Influência do processo executivo

No presente trabalho, foi analisada também a influência do processo executivo na magnitude dos deslocamentos máximos. O programa Plaxis permite ativar a execução das diferentes etapas (escavação, instalação do grampo, execução do revestimento) em períodos distintos. Para esta análise, foram considerados 3 diferentes processos executivos para espessura de 10 cm (utilizada na obra).

Os diferentes processos estão listados na Tabela 12, e destacados a seguir:

- Processo executivo 01: as diferentes etapas (escavação, instalação do grampo, execução do revestimento) foram realizadas em um período de 24 horas cada;
- Processo executivo 02: a escavação e a instalação do grampo são realizadas em 24 horas, seguida da execução do revestimento em 24 horas também;
- Processo executivo 03: em um período de 24 horas, são realizadas as etapas de escavação, instalação do grampo e execução do revestimento.

A Figura 59 apresenta as distribuições de deslocamentos horizontais previstas, considerando os diferentes processos executivos. Observa-se que, após a instalação do grampo, o tempo necessário para a execução do revestimento da face do talude pouco influencia na magnitude dos deslocamentos. No entanto, quando a instalação do grampo é realizada imediatamente após a escavação, com posterior execução da face do talude, os deslocamentos podem ser minimizados.

Os valores dos deslocamentos encontrados para a etapa construtiva 03 são similares ao obtidos pela instrumentação de campo (Figura 49). Este foi o processo adotado nas análises numéricas realizadas no presente trabalho.

Tabela 12 – Descrição dos processos executivos

	Etapa	Tempo Considerado até início da nova etapa
Processo Executivo 01	Escavação	24h
	Instalação do Grampo	24h
	Execução do Revestimento	24h
	Nova Escavação	24h
Processo Executivo 02	Escavação + Instalação do Grampo	24h
	Execução do Revestimento	24h
	Nova Escavação	24h
Processo Executivo 03	Escavação + Instalação do Grampo + Execução do Revestimento	24h
	Nova Escavação	24h

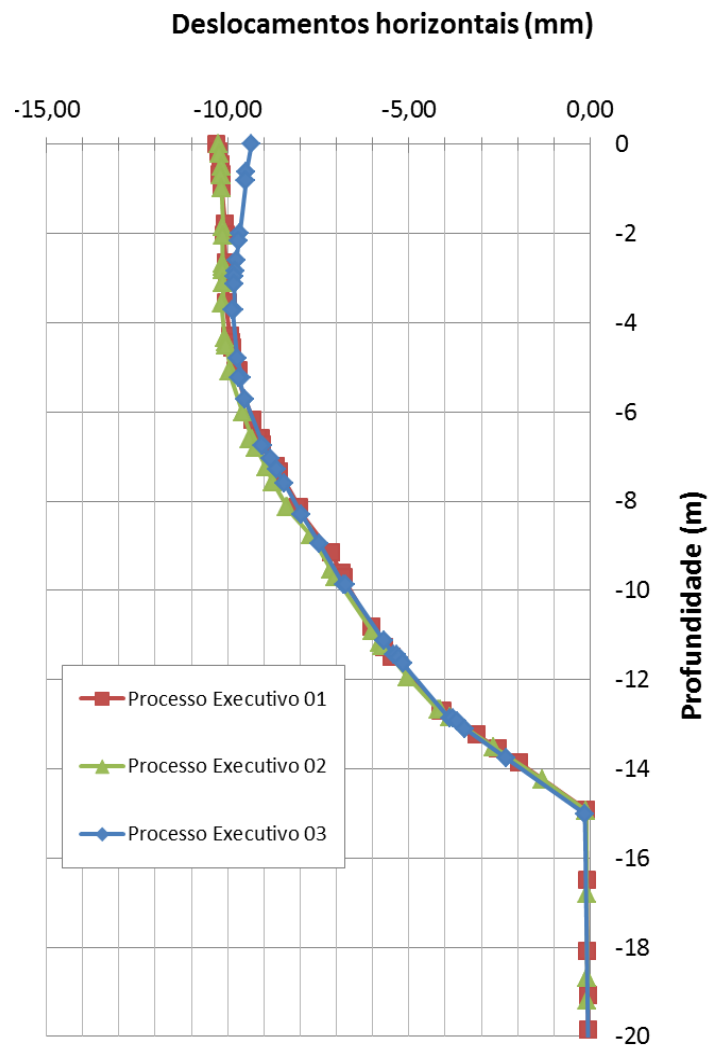


Figura 59 – Influência do Processo Executivo

A partir destas análises, onde os deslocamentos horizontais máximos foram de 10,3mm, 10,3mm e 10,1mm, respectivamente, foi possível observar que a ação de deixar o maciço trabalhar sem a rápida instalação do grampo e execução do revestimento da face, pode aumentar os deslocamentos horizontais em cerca de 2%. O ideal, e recomendado na prática, é realizar estas etapas (escavação, instalação do grampo e execução do revestimento) no mesmo dia (com 24 h, conforme adotado na última análise).

Finalmente, cabe ressaltar que a magnitude dos deslocamentos horizontais da obra foi da ordem de 0,1% da altura de escavação ($D_{hmax} = 13 \text{ mm}$ para $H = 13,50 \text{ m}$), conforme previsto por Clouterre (1991) e constatado com a instrumentação.

Clouterre através de ensaios em muros instrumentados observou que os deslocamentos variaram entre 0,10% e 0,30% da altura de escavação. Esta situação também pode ser observada nas modelagens desta pesquisa, onde os deslocamentos se encontraram no intervalo de 0,0726% (9,8 mm) a 0,1037% (14,0 mm).

3.3.1. Influência da velocidade de escavação

Dependendo do espaço físico do local a ser estabilizado e do tamanho da obra/empreendimento, a utilização de equipamentos mecânicos para executar a escavação torna-se imprescindível, garantindo redução de prazo e agilidade na obra.

Como estes equipamentos conseguem acelerar o andamento da estabilização, é comum, na prática executiva, aumentar a altura de escavação. Em alguns casos, são executadas 2 linhas de escavação e instalação dos grampos destas respectivas linhas no mesmo dia, dependendo do tipo de solo e da experiência do operador de máquinas. A Figura 60 ilustra o procedimento de escavação mecânica.



Figura 60 – Escavação mecânica para execução de solo grampeado, Niterói - RJ
(Lima, 2007)

Diante do exposto, optou-se por realizar uma análise, comparando os deslocamentos horizontais máximos da escavação para 2 processos executivos distintos, apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação entre 2 processos executivos

Processo Executivo 03		X	Processo com duas linhas de escavação	
1 Linha de Escavação	24h		2 Linhas de Escavação	24h
Instalação do Grampo			Instalação dos grampos (2)	
Revestimento da Face			Revestimento da face	

A Figura 61 apresenta a influência da velocidade de escavação. É possível observar que a execução de 2 linhas de escavação não conduziu a variações na magnitude dos deslocamentos horizontais. A execução de 2 linhas de escavação torna-se uma alternativa vantajosa em função da agilidade dos serviços, se forem realizados ensaios prévios para confirmação dos parâmetros de resistência do solo, e executadas observações de campo a respeito de possíveis rupturas pontuais à medida que a escavação for avançando. Neste caso, a estabilização poderá ser finalizada em um prazo menor e com magnitudes de deslocamento praticamente coincidentes, prática adotada por alguns construtores.

Cabe ressaltar, que em algumas situações, o uso de equipamentos mecânicos não é possível, sendo a escavação executada com equipamentos manuais. Quando isto ocorre, é mais usual a execução de uma linha de escavação por vez.

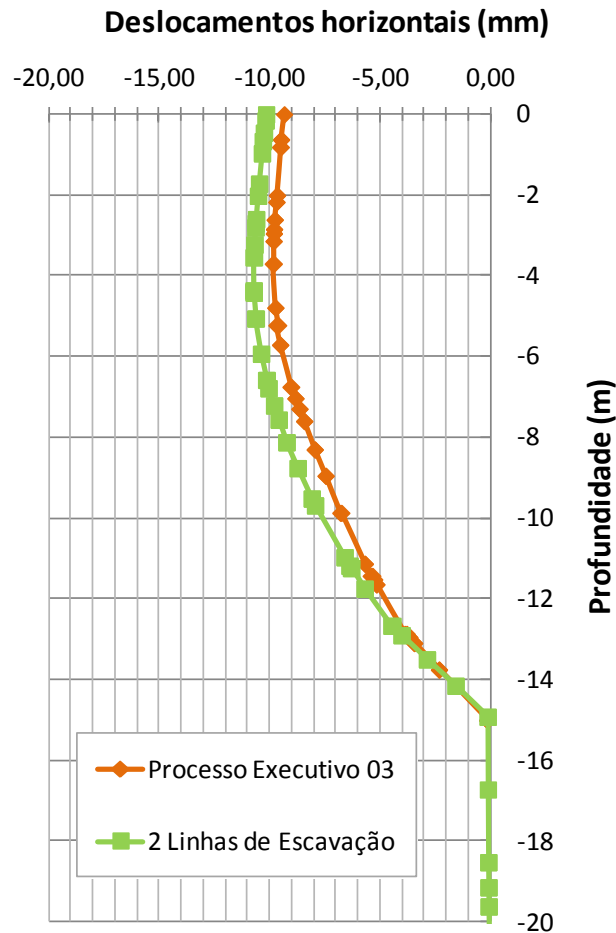


Figura 61 – Influência da velocidade de escavação – Processo Executivo 3: $D_{h\text{máx}} = 10,1$ mm e Processo com 2 linhas de escavação: $D_{h\text{máx}} = 10,8$ mm.

3.4. Influência do travamento do grampo

Finalmente, foi realizada uma última análise sobre o comportamento da estrutura considerando o travamento do grampo com placas e porcas. Para tanto, foi adotado um elemento do Plaxis, denominado *fixed-end anchor*, para representar este travamento (Figura 62). Os valores adotados foram baseados nas informações fornecidas pelo manual de sistemas GEWI para barras com 32 mm de diâmetro.

A espessura do revestimento de concreto adotada foi de 10 cm, e o processo executivo considerado foi escavação, instalação do grampo e revestimento no mesmo dia (processo executivo 03). A Figura 63 ilustra os deslocamentos observados na análise.

Ao executar a instalação das placas e porcas na cabeça do grampo, ocorre uma restrição maior aos deslocamentos. Como era de se esperar, os deslocamentos horizontais considerando o travamento dos grampos com a instalação das placas e porcas foi inferior quando comparado sem a consideração deste travamento. Os deslocamentos horizontais foram de 10,1 mm enquanto para a análise sem o travamento foi de 14,0 mm.

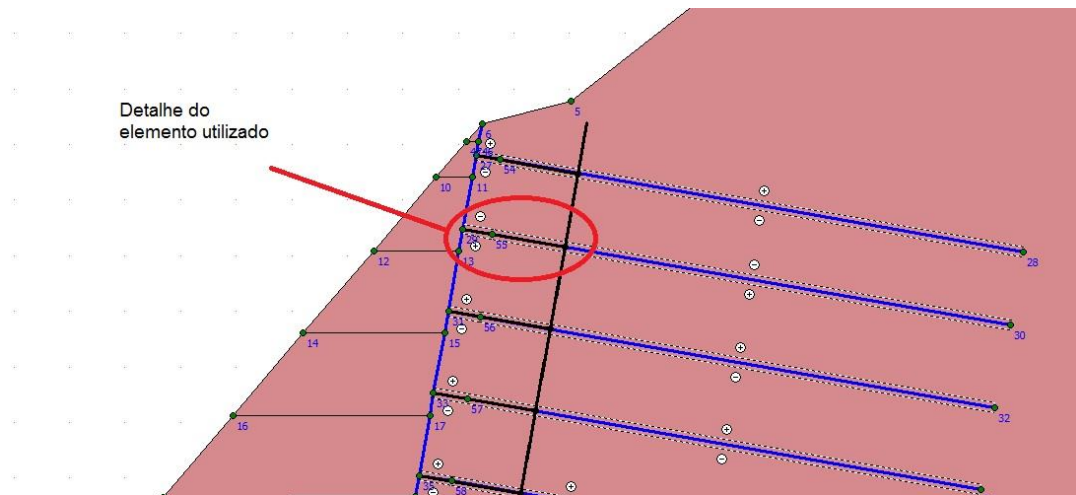


Figura 62 – Detalhe do elemento *fixed-end anchor* para representação do travamento dos grampos realizado por placas e porcas

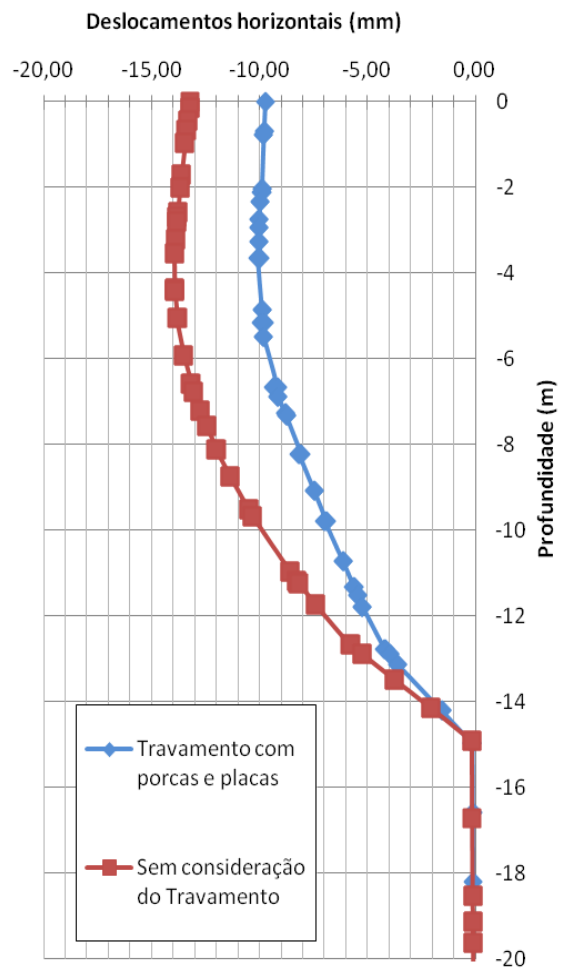


Figura 63 – Influência do travamento do grupo

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo principal realizar uma retroanálise de uma obra instrumentada para validação do programa PLAXIS e avaliar a influência do revestimento da face na magnitude dos deslocamentos. As análises realizadas permitiram as seguintes conclusões:

- I. O comportamento da curva deslocamento horizontal x profundidade foi próximo ao encontrado na instrumentação, com valores de deslocamentos máximos semelhantes.
- II. A adoção de elementos de barra para representação dos grampos mostrou-se como a melhor alternativa, já que os deslocamentos previstos mostraram-se próximos aos medidos no campo.
- III. Após confirmação do melhor elemento para caracterização dos materiais e com os parâmetros do solo definidos, foi realizada nova análise a respeito da sequência executiva. Através destas análises, foi possível concluir que a execução da face realizada no dia da instalação do grampo ou posteriormente, influencia pouco na magnitude dos deslocamentos.
- IV. Os esforços nos grampos foram satisfatoriamente reproduzidos nas análises numéricas, confirmando a confiabilidade das previsões.
- V. Ainda sobre a influência do processo executivo, foi possível concluir que a rápida instalação do grampo após a escavação é capaz de minorar em 2 % os deslocamentos.
- VI. A espessura do revestimento da face não mostrou influência na deformabilidade da estrutura, confirmando sua finalidade de conter possíveis rupturas localizadas com o andamento dos serviços, não atuando ativamente para diminuição dos deslocamentos da face.
- VII. Quando o travamento do grampo através da instalação das placas e porcas não foi considerado nas análises, os deslocamentos horizontais sofreram um acréscimo da ordem de 40%.

VIII. O PLAXIS mostrou ser um software capaz de reproduzir o comportamento de estruturas em solo grampeado. Com os parâmetros de solo bem definidos e a escolha adequada dos modelos constitutivos, os valores previstos podem corresponder aos valores observados no campo.

4.2. Trabalhos futuros

De posse de mais resultados de instrumentações e investigações geotécnicas com definições dos diferentes tipos de solo encontrados no Brasil (principalmente os solos residuais), torna-se possível a realização de uma análise paramétrica mais ampla identificando o efeito e a influência de cada um dos parâmetros no comportamento da estabilização. Sendo assim, como execução de trabalhos futuros, propõe-se:

- i. Incorporação de novos dados no banco de dados na definição dos parâmetros dos solos.
- ii. Execução de estudos mais abrangentes sobre a influência dos parâmetros mais relevantes (E , ϕ , c , diâmetro da barra, comprimento, etc) na deformabilidade da estrutura.
- iii. Comparar o efeito das inclinações da escavação com a deformabilidade da estrutura.

REFERÊNCIAS

- [1] AZAMBUJA, E., STRAUSS, M., SILVEIRA, F. G., 2001, “Caso histórico de um sistema de contenção em solo grampeado em Porto Alegre, RS”. In: Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. único, pp.435-443, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.
- [2] AZAMBUJA, E., STRAUSS, M., SILVEIRA, F. G., 2001, “Caso histórico de um sistema de contenção em solo grampeado em Porto Alegre, RS”. In: Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. único, pp.435-443, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.
- [3] AZAMBUJA, E., STRAUSS, M., SILVEIRA, F.G., 2003, “Sistemas de contenção em solo grampeado na cidade de Porto Alegre, RS”. In: Anais do Workshop sobre Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, ABMS, pp. 21-34, São Paulo (SP), Outubro.
- [4] CLOUTERRE, 1991, 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, July. Edited by F. Schlosser.
- [5] GERSCOVICH, D. M. S., SIEIRA, A. C. C. F., LIMA A. P., SAYÃO, A. S. F. J., 2005, “Técnicas de modelagem numérica de escavações de taludes em solo grampeado”. In: IV Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (IV COBRAE) ,Salvador,. v.2. p.671 – 680, Setembro.

- [6] DIAS, P. H. V., SAYÃO, A. S. F. J., SPRINGER, F. O., 2006, "Estabilização de taludes: tirantes ou grampos?". In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas (SBMR), III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia (CLBG), v. CD-ROM, Curitiba (PR), Agosto.
- [7] DRINGENBERG, G. E., CRAIZER, W., 1992, "Estabilização de taludes por pregagem projeto-execução". In: Anais da I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. 3, pp. 853-864, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.
- [8] EHRLICH, M., 2003, "Solos grampeados – comportamento e procedimentos de análise". In: Anais do Workshop sobre Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, pp. 127-137, São Paulo (SP), Outubro.
- [9] ELIAS, V., JURAN, I., 1991, Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations. In: Report FHWA-RD-89-198, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- [10] FALCONI, F. E., ALONSO, V. R., 1997, "Controle da qualidade em estruturas de contenção em solo grampeado". In: Anais da II Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. 2, pp. 613-618, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.
- [11] FEIJÓ, R. L., 2007, Monitoração de uma Escavação Experimental Grampeada em Solo Residual Gnáissico Não Saturado, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [12] FEIJÓ, R. L., EHRLICH, M., 2001, "Resultados de ensaios dearrancamento em grampos injetados em dois pontos do município do Rio de Janeiro". In: Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. único, pp. 517-524, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.

- [13] FEIJÓ, R. L., EHRLICH, M., 2003, "Nail pullout tests in residual soils in Rio de Janeiro – Brazil". In: Proceedings of the XII Panameric an Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (PCSMGE), v. 2, pp. 2133-2138, Boston, June.
- [14] FEIJÓ, R. L., EHRLICH, M., 2005, "Resultados do monitoramento de uma obra experimental em solo grampeado". In: Anais da IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. 2, pp. 633-642, Salvador (BA), Setembro.
- [15] FEIJÓ, R. L., EHRLICH, M., 2006, "Análise dos resultados do monitoramento de uma obra experimental em solo grampeado". In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas (SBMR), III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia (CLBG), v. CD-ROM, Curitiba (PR), Agosto.
- [16] GÄSSLER, C., 1990, "Discussion to session 3". In: Proceedings of the International Reinforced Soil Conference, pp. 283-284, Glasgow, Scotland, September. Edited by A. McGown, K. Yeo, K.Z. Ardrawen, British Geotechnical Society, London, UK.
- [17] GEORIO, 1999, "Ancoragens e Grampos". In: Ortigão, J.A.R., Sayão, A.S.F.J. (editores), Manual Técnico de Encostas, v. 4, Rio de Janeiro, Fundação GeoRio.
- [18] GOMES SILVA, A. M. B., 2006, Condicionantes Geológico-Geotécnicos de Escavação Grampeada em Solo Residual de Gnaisse, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- [19] GUILLOUX, A., SCHLOSSER, F., 1982, "Soil nailing: practical applications". In: Proceedings of the International Symposium Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Asian Institute of Technology, pp. 389-397, Bangkok, Thailand, November/December. Edited by A.S. Balasubramaniam, J.S. Younger, S. Chandra, F. Prinz, D.T. Bergado, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [20] HONG, Y. S., CHEN, R. H., WU, C. S., 2001, "Numerical modeling of nailed soil walls in vertical excavation". In: Proceeding of the Eighth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, pp. 261-262, Eisenstadt, Vienna, Austria, September. Edited by B.H.V. Topping, Ed. Civil-Comp Press, Stirling, Scotland.
- [21] JEWELL, R. A., 1990, "Review of theoretical models for soil nailing". In: Proceedings of the International Reinforced Soil Conference, British Geotechnical Society, pp. 265-275, Glasgow, UK, September. Edited by A. McGown, K. Yeo, K.Z. Andrawes, Thomas Telford, London, UK.
- [22] JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, K., ELIAS, V., 1990, "Design of soil nailed retaining structures". In: Proceedings of the Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Cornell University, pp. 644-659, Ithaca, EUA, June. Edited by P. Lambe, L.A. Hansen, Geotechnical Special Publication n. 25, Geotechnical Engineering Division of the ASCE, New York, EUA.
- [23] JURAN, I., ELIAS, V., 1987, "Soil nailed retaining structures: Analysis of case histories". In: Proceedings of the Symposium Soil Improvement - A Ten Year Update, pp. 232-244, New Jersey, EUA, April. Edited by J.P. Welsh, Geotechnical Special Publication n. 12, Geotechnical Engineering Division of the ASCE, New York, EUA.

- [24] LAZART, C. A., ELIAS, V., ESPINOZA, R. D., SABATINI, P. J., 2003, Soil nail walls. In: Report FHWA0-IF-03-017, Geotechnical Engineering Circular n. 7, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, March.
- [25] LEITE, R. A., 2007, Mobilização de Resistência ao Arrancamento de Grampos com Fibras de Polipropileno, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [26] LIMA, A. M. L., 1996, Análise Numérica do Comportamento de Solos Grampeados, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [27] LIMA, A. P., 2002, Deformabilidade e Estabilidade de Taludes em Solo Grampeado, Dissertação de M.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [28] LIMA, A. P., 2007, Comportamento de uma Escavação Grampeada em Solo Residual de Gnaisse, Tese de D.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [29] LIMA, A. P., SPRINGER, F. O., SAYÃO, A. S. F. J., GERSCOVICH, D. M. S., ORTIGÃO, J. A. R., 2002, "Modelagem numérica de estruturas de contenção com solo grampeado". In: Anais da XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Universidade de Brasília, v. CD-ROM, pp. 1-9, Brasília (DF).
- [30] MAGALHÃES, M. A., 2005, Resistência ao Arrancamento de Grampos com Fibras de Polipropileno, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [31] MITCHELL, J. K. & VILLET, W. C. B. (EDITORS, 1987), "Reinforcement of Earth Slopes and Embankments", NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C..

- [32] NUNES, A. L. L. S., SAYÃO, A. S. F. J., SPRINGER, F. O., LIMA, A. P., SARÉ, A. R., DIAS, P. H. V., 2006, "Instrumentação e monitoramento de taludes em solo grampeado". In: Anais do 10º Congresso Nacional de Geotecnia (CNG), Lisboa, Portugal, Maio.
- [33] ORTIGÃO, J. A. R., 1997, "Ensaio de Arrancamento para Projetos de Solo Grampeado", Nota Técnica, Solos e Rochas, ABMS, v. 20, n. 1 (Abr), pp. 39-43.
- [34] ORTIGÃO, J. A. R., CUNHA, R. P., ALVES, L. S., 1996, "In Situ Tests in Brasília Pore Clay", Canadian Geotechnical Journal, v. 33, n. 1 (Feb), pp. 189-198.
- [35] ORTIGÃO, J. A. R., D'ÁVILA, C. J. R., SILVA, S. P., MAIA, H. S., 1992, "Solo grampeado no morro da formiga, RJ". In: Anais da I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. 1, pp. 47-56, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.
- [36] ORTIGÃO, J. A. R., PALMEIRA, E. M., ZIRLIS, A., 1997, "Optimised design for soil nailed walls". In: Proceedings of the 3rd International Conference on Ground Improvement Geosystems (GIGS), pp. 368-374, London, UK, June. Edited by M.C.R. Davies, F. Schlosser, Ground Improvement Geosystems, Thomas Telford, London, UK.
- [37] PROTO SILVA, T., 2005, Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaisse, Dissertação de M.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [38] PROTO SILVA, T., SAYÃO, A. S. F. J., NUNES, A. L. L. S., DIAS, P. H. V. D., 2006, "Avaliação semi-empírica da resistência ao arrancamento de grampos". In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas (SBMR), III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia (CLBG), Curitiba (PR), Agosto.

- [39] SCHLOSSER, F., 1982, "Behavior and design of soil nailing". In: Proceedings of the International Conference on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, pp. 399-413, Bangkok, Thailand.
- [40] SCHLOSSER, F., UNTERREINER, P., 1990, "Soil nailing in France – research and practice". In: Proceedings of the 1st International Seminar on Soil Mechanics And Foundation Engineering of Iran, Iranian Geotechnical Society, v. 2, pp. 436-468, Iran.
- [41] SCHLOSSER, F., UNTERREINER, P., PLUMELLE, C., 1993, "Validation des Méthodes de Calcul de Clouage par Les Expérimentations du Projet National CLOUTERRE", Revue Française de Géotechnique, n. 64.
- [42] SILVA, J. C., 1999, Análise Numérica de Estruturas Grampeadas, Dissertação de M.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [43] SOARES, J. E. S., GOMES, R. C., 2003, "Um caso de solo grampeado na encosta da BR-101 em Angra dos Reis, RJ". In: Anais do Workshop sobre Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, ABMS, pp. 49-56, São Paulo (SP), Outubro.
- [44] SOUZA, G. J. T., PITTA, C. A., ZIRLIS, A. C., 2007, "Solo grampeado – aspectos executivos do chumbador". In: Anais da IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. 2, pp. 835-844, Salvador (BA), Setembro.
- [45] SPRINGER, F. O., 2001, Estudos de Deformabilidade de Escavações com Solo Grampeado, Dissertação de M.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [46] SPRINGER, F. O., 2006, Ensaios de Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaisse, Tese de D.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- [47] SPRINGER, F. O., GERSCOVICH, D. M. S., SAYÃO, A. S. F. J., 2001, “Deformabilidade de taludes estabilizados com solo grampeado”. In: Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), v. único, pp. 483-490, Rio de Janeiro (RJ), Novembro.
- [48] UNTERREINER, P., SCHLOSSER, F., BENHAMIDA, B., 1995, “Calculation of the displacements of a full scale experimental soil nailed wall – French National Research Project Clouterre”. In: Proceedings of the Symposium on the Practice of Soil Reinforcing in Europe, IGS, Institution of Civil Engineers, London, UK, May. Edited by Thomas Telford, London, UK.
- [49] ZIRLIS, A. C., PITTA, C. A., 2000, “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.
- [50] ZIRLIS, A. C., PITTA, C. A., SOUZA, G. J. T., 2007, “Um caso de obra especial: contenção pelo método de solo grampeado, subjacente a um solo grampeado pré-existente”. In: Anais do 6º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia (SEFE), v. 2, pp. 535-543, São Paulo (SP), Novembro.
- [51] WONG C. K., SHIU Y. K., YUNG P. C. Y., 1997, “Design, construction and performance of a soil nailed excavation in Hong Kong”