

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

RENATO GOMES DOS REIS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE GRAMPOS VERTICAIS NOS
DESLOCAMENTOS DE SOLO GRAMPEADO**

Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências, pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

Versão Corrigida
Original se encontra disponível na unidade que aloja o programa

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R375a Reis, Renato Gomes dos
 Análise da Influência de Grampos Verticais nos
Deslocamentos de Solo Grampeado / Renato Gomes dos
Reis; orientador Edmundo Rogério Esquivel. São Carlos,
2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2022.

1. Solo grampeado. 2. Grampo vertical. 3. Modelagem
numérica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RENATO GOMES DOS REIS**.

Título da dissertação: “Análise da influência de grampos verticais nos deslocamentos de solo grampeado”.

Data da defesa: 21/06/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Dr. **Edmundo Rogerio Esquivel**
(Orientador)

Aprovado

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Dr. **Fernando Henrique Martins Portelinha**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **José Orlando Avesani Neto**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

A minha família, especialmente aos meus Pais (Reis e Maria) e meu irmão (Bruno), por todo apoio e incentivo durante o período de mestrado, pois sem eles eu não estaria aqui.

Ao meu orientador Professor Edmundo Rogério Esquivel, por ter me aceitado como orientado e também o apoio dado durante o processo.

Ao Professor Waldemar Coelho Hachich por toda a ajuda e contribuições valiosas no estudo.

A Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), em especial ao Departamento de Geotecnia e os membros que fazem parte dele.

Ao CNPQ, pelo apoio financeira à pesquisa.

Ao meu chefe e amigo, Engenheiro Alessandro Lugli Nascimento, pelo apoio e sugestões dados durante o estudo.

A minha namorada e amiga, Liz, por toda parceria, apoio, compreensão e incentivo.

Aos meus amigos que de alguma forma diretamente ou indiretamente me ajudaram e apoiaram durante esse período da minha vida.

E por último, e não menos importante, agradeço a mim pela dedicação e foco no objetivo e propósito que havia traçado.

“A verdadeira felicidade está em não perder de vista o rumo certo, por mais alto que voem nossos sonhos e aspirações...”

RESUMO

REIS, R.G. **Análise da influência de grampos verticais nos deslocamentos de solo grampeado.** 2022. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A utilização da técnica de solo grampeado para reforço de escavações é vasta tanto nacionalmente quanto internacionalmente. Ao longo dos anos modelos e hipóteses para seu dimensionamento foram aprimoradas e encontram-se bem fundamentadas atualmente. Contudo, com a expansão urbana e maiores desafios na área de Engenharia, novas alternativas e adaptações da técnica são demandadas. Uma das adaptações do uso do solo grampeado é a utilização de grampos verticais executados, normalmente, antes do início da escavação, propiciando um aumento da rigidez da face da escavação e do maciço de solo e, conseqüentemente, reduzindo os deslocamentos totais durante e após o processo de escavação. Apesar dos relatos empíricos sobre a efetividade da utilização dessa técnica, seu uso ainda carece de maiores investigações, ficando a critério de cada projetista e/ou executor a adoção dos parâmetros envolvidos. Isso posto, a presente pesquisa tem como objetivo principal analisar numericamente a influência da utilização de grampos verticais nos deslocamentos de solo grampeado. Para tanto, foram criados modelos hipotéticos tridimensionais através do *software* RS3 (Rocscience) de uma escavação reforçada com solo grampeado utilizando grampos verticais. Com o intuito de analisar diferentes cenários, realizou-se um estudo paramétrico alterando-se o tipo de solo, diâmetro, ficha, inclinação, quantidade de linhas e espaçamento horizontal dos grampos verticais. Ademais, também se analisou a influência do comprimento dos grampos sub-horizontais na redução dos deslocamentos devido à possível influência dos grampos verticais. Os resultados mostram que o grampo vertical tem uma maior efetividade na redução dos deslocamentos em solos mais deformáveis e menos resistentes. Quanto ao diâmetro, os resultados indicam que há uma maior efetividade na redução dos deslocamentos com diâmetros maiores. Quanto ao comprimento da ficha, seu aumento propicia redução dos deslocamentos. Porém, para valores maiores do que 2 a 3m a redução não é expressiva. A inclinação dos grampos verticais reduz a efetividade na diminuição dos deslocamentos. O aumento dos grampos sub-horizontais diminui a efetividade do grampo vertical na redução dos deslocamentos horizontais, porém não nos deslocamentos verticais. Em geral, a utilização de grampos verticais leva a uma redução de deslocamentos horizontais e verticais, com uma maior efetividade nos verticais, e conseqüentemente, reduzindo também os possíveis danos a estruturas adjacentes.

Palavras-chave: Grampo vertical, Solo grampeado, Modelagem numérica.

ABSTRACT

REIS, R.G. **Analysis of the influence of vertical nails on nailed-soil displacements**. 2022. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, São Carlos, 2022.

The use of soil nailing technique to reinforce excavations is vast both nationally and internationally. Over the years, models and hypotheses for its design were improved. However, with urban expansion and greater challenges in the field of Engineering, new alternatives and technical adaptations are demanded. One of the adaptations of the use of soil nailing is the use of vertical nails, normally executed before the beginning of the excavation, providing an increase in the stiffness of the excavation face and of the soil mass and, consequently, reducing the total displacements during and after the excavation process. Despite the empirical reports on the effectiveness of the use of the technique, its use still needs further investigation, and its adoption and the parameters involved remain at the decision of each designer and/or executor. That said, the main objective of this research is to numerically analyze the influence of the use of vertical nails on soil nailing displacements. Therefore, three-dimensional hypothetical models were created using RS3 software (Rocscience) of a reinforced excavation with soil nail using vertical nails. To analyze different scenarios, a parametric study was carried out, changing the type of soil, diameter, length, inclination, number of lines and horizontal spacing of the vertical nails. Furthermore, the influence of the increase in the sub-horizontal nail on the reduction of displacements due to the consideration of the vertical nails was also analyzed. The results show that the vertical nail has greater effectiveness in reducing displacements in more deformable and less resistant soils. In the case of diameter, the results indicate that there will be greater effectiveness in reducing displacements with larger diameters. The length of the vertical nail was another parameter that, with its increase, the greater the reduction in displacements, but for values greater than 2~3m, below the base of the excavation, the increase was not so expressive. The adoption of inclination in the vertical nail resulted in a reduction in its effectiveness in reducing displacements. With the increase of the sub-horizontal nail, there is a decrease in the effectiveness of the vertical nail in reducing horizontal displacements, but this was not reflected in the vertical displacement. In general, the use of the vertical nail showed a reduction in horizontal and vertical displacement, but with greater effectiveness in the vertical ones and, consequently, in possible damage to adjacent structures.

Keywords: Vertical nail, Soil nailing, Numerical modeling.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Justificativa	28
1.2	Objetivos	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1	Método construtivo	31
2.2	Elementos do solo grampeado	32
2.3	Comportamento do Solo Grampeado.....	33
2.3.1	Interação solo-grampo	34
2.3.2	Distribuição de tensões no grampo.....	36
2.3.3	Estados limites	38
2.3.3.1	Estado limite último (ELU)	38
2.3.3.2	Estado limite de serviço (ELS)	39
2.3.4	Análises tensão-deformação	43
2.4	Grampos Verticais	47
2.4.1	Injeção preliminar do solo	53
2.4.2	Elemento estrutural.....	55
2.4.3	Elemento de fundação	56
2.4.4	Efeito de arqueamento	56
2.4.5	Parâmetros de projeto	58
2.4.6	Análises numéricas	58
2.5	Danos devidos às escavações.....	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
3.1	Modelo sem grampo vertical	71

3.1.1	Modelo constitutivo e parâmetros de solo.....	71
3.1.2	Geometria, condições de contorno e discretização da malha	72
3.1.3	Etapas de escavação.....	75
3.1.4	Tipo de elemento para o grampo sub-horizontal e face.....	75
3.1.5	Análise dos resultados	78
3.2	Modelo com grampo vertical	78
3.2.1	Modelo com parâmetros de Gerscovich <i>et al.</i> (2005)	78
3.2.2	Análise de sensibilidade dos parâmetros de solo.....	79
3.2.3	Análise paramétrica do grampo vertical	81
3.2.4	Tipo de elemento para o grampo vertical	83
3.2.4.1	Parâmetros do elemento de viga	84
3.2.4.2	Critério de ruptura.....	85
3.2.4.3	Interação solo-grampo	86
3.2.4.3.1	Rigidez Normal (<i>kn</i>)	87
3.2.4.3.2	Rigidez Axial (<i>ks</i>).....	88
3.2.4.4	Análise dos critérios adotados	91
3.2.4.4.1	Carregamento vertical.....	91
3.2.4.4.2	Carregamento Horizontal.....	93
3.2.5	Análise dos resultados	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1	Modelo sem grampo vertical	97
4.2	Modelo com grampo vertical.....	101
4.2.1	Modelo com parâmetros de Gerscovich <i>et al.</i> (2005)	101
4.2.2	Análise de sensibilidade do solo.....	103
4.2.2.1	Coesão e módulo de elasticidade	103

4.2.2.2	Ângulo de atrito e módulo de elasticidade.....	105
4.2.2.3	Resumo do estudo de sensibilidade do solo.....	106
4.2.3	Análise paramétrica do grampo vertical.....	108
4.2.3.1	Parâmetros de solo	108
4.2.3.2	Modelo sem grampo vertical	109
4.2.3.3	Comprimento <i>GV</i>	111
4.2.3.3.1	Deslocamentos horizontais	111
4.2.3.3.2	Deslocamentos verticais	112
4.2.3.3.3	Danos às estruturas adjacentes.....	113
4.2.3.4	Influência da inclinação	115
4.2.3.4.1	Deslocamentos horizontais	115
4.2.3.4.2	Deslocamentos verticais	116
4.2.3.4.3	Danos às estruturas adjacentes.....	117
4.2.3.5	Influência da quantidade de linhas de <i>GV</i>	120
4.2.3.5.1	Deslocamentos horizontais	122
4.2.3.5.2	Deslocamentos verticais	123
4.2.3.5.3	Danos às estruturas adjacentes.....	124
4.2.3.6	Influência do comprimento do grampo sub-horizontal.....	125
4.2.3.6.1	Deslocamentos horizontais	125
4.2.3.6.2	Deslocamentos verticais	127
4.2.3.6.3	Danos às estruturas adjacentes.....	128
4.2.3.7	Influência espaçamento horizontal do grampo vertical	130
4.2.3.7.1	Deslocamentos horizontais	131
4.2.3.7.2	Deslocamentos verticais	132
4.2.3.7.3	Danos às estruturas adjacentes.....	132

4.2.3.8	Influência nos esforços axiais dos grampos sub-horizontais	133
4.2.3.9	Resumo dos resultados e comparação com resultados de literatura e campo 136	
5	CONCLUSÕES	141
6	REFERÊNCIAS	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases construtivas de solo grampeado em corte (Clouterre, 1991)	31
Figura 2 - Reforço de taludes naturais com solo grampeado (Solotrat, 2020)	32
Figura 3 - Componentes principais do solo grampeado (Fonte: autor)	33
Figura 4 - Esforços nos grampos: (a) esforços de cisalhamento; (b) esforços de tração (Ortigão, Zirlis, e Palmeira, 1993).....	34
Figura 5 - Zona ativa e passiva de solo grampeado (Erlich e Zirlis, 2016)	36
Figura 6 - Distribuição dos esforços de tensão axial nos grampos (adaptado FHWA, 2015)	37
Figura 7 - Deslocamentos horizontais na face de solo grampeado (adaptado Guilloux e Schlosser, 1982).....	40
Figura 8 - Deslocamentos horizontais em solo grampeado (adaptado Clouterre, 1991)...	41
Figura 9 - Ilustração da deformação de paramentos de solo grampeado (adaptado FHWA, 2015).....	42
Figura 10 - Valores da % de deformação horizontal com a altura de corte (Pitta, Souza e Zirlis, 2003)	42
Figura 11 - Comparação dos valores de % de deformação horizontal com a altura de corte (Pitta, Souza e Zirlis, 2003)	43
Figura 12 - Influência da inclinação do talude nos deslocamentos de solo grampeado (Lima, 2002).....	44
Figura 13 - Comparação dos deslocamentos horizontais (adaptado Singh e Babu, 2010)	47
Figura 14 - Escavação do solo entre bermas (Pitta, Souza e Zirlis, 2013)	48
Figura 15 - Execução de grampos preliminarmente ao início da escavação	49
Figura 16 - Utilização de grampos verticais (Pitta, Souza e Zirlis, 2013).....	49
Figura 17 - Utilização de grampos verticais (adaptado Pitta, Souza e Zirlis, 2013)	50
Figura 18 - Tipos de solo grampeado composto. 1) Solo grampeado; 2) Concreto projetado; 3) Tirante; 4) cortina de reforço com nata de cimento; 5) micro estaca (adaptado Fu ,2015)	51
Figura 19 - Fases construtivas do chumbador pressurizado (Pitta, Zirlis e Souza, 2018) .	54
Figura 20 - Planos de clavagem no grampo executado com injeção (Souza, Pitta e Zirlis, 2005).....	54

Figura 21 - Grampos não injetados acima e grampos injetados abaixo (Pitta, Barbosa e Assis, 2017)	55
Figura 22 - Estacas raiz reticuladas (adaptado FHWA, 2005)	55
Figura 23 - Efeito de arco em contenção de perfil pranchado (adaptado Hosseinian e Seifabad, 2013)	57
Figura 24 - Efeito de arco em solo grampeado (adaptado Bishop, Jameson e DeBernardi, 2009)	58
Figura 25 - Modelo 3D e 2D do solo grampeado de Ferreira (2019)	59
Figura 26 - Modelo com 4 grampos verticais de Souza (2019)	60
Figura 27 - Modelo de solo grampeado com grampo vertical utilizado por Mucheti, Albuquerque e Garcia (2019)	61
Figura 28 - Deslocamentos horizontais em escavações com e sem grampos verticais (Gondim e Garcia, 2018)	62
Figura 29 - Modelo de solo grampeado composto utilizado por Jianhua, Guang, e Erxaing (2012). a) Características da escavação; b) resultado obtidos com e sem a inclusão de grampos verticais	63
Figura 30 - Modelo de solo grampeado composto utilizado por Zhao et al. (2013). a) Características da escavação; b) resultado obtidos com e sem a inclusão de grampos verticais	64
Figura 31 - Modelo tridimensional elaborado por Liu, Liu, e Song (2017)	65
Figura 32 - Ilustração de recalque e rotação, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)	66
Figura 33 - Ilustração de deflexão proporcional, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)	66
Figura 34 - Ilustração de inclinação e distorção angular, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)	67
Figura 35 - Ilustração de deformação horizontal, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)	67
Figura 36 - Distorção angular relacionada ao possível dano, Bjerrum (1963) apud Albuquerque & Garcia (2020)	69
Figura 37 - Critérios de danos, adaptado Boscardin e Cording (1989)	70

Figura 38 - Geometria do modelo adotado por Lima (2002) e Gerscovich et al. (2005) ..	72
Figura 39 - Modelo 2D elaborado no software RS2.....	72
Figura 40 - Visão paramétrica do modelo 3D elaborado no software RS3	73
Figura 41 - Visão do plano ZX do modelo elaborado no software RS3.....	73
Figura 42 - Condições de contorno para o modelo 3D.....	74
Figura 43 - Modelo de Fully Bonded no RS2 e RS3 (Rocscience, 2019a, 2019b)	76
Figura 44 - Critério de ruptura do elemento Fully Bonded no RS2 e RS3 (Rocscience, 2019a, 2019b)	77
Figura 45 – Variação nos ângulos do grampo vertical em relação ao paramento: 0° (a); 5° (b); e 10° (c)	82
Figura 46 - Consideração de meio grampo vertical no modelo.....	83
Figura 47 - Geometria do elemento de viga na malha de elemento finitos (Rocscience, 2019b).....	84
Figura 48 – Modelos de molas para simulação da resposta lateral (a) e curva p-y (b) do comportamento solo-grampo (RSPile, 2020)	87
Figura 49 - Discretização do elemento de viga no RS3 (RSPile, 2020a, 2020b)	88
Figura 50 - Resultado de deslocamento horizontais máximos de acordo com a variação de ks.....	90
Figura 51 - Modelo de estaca sendo carregada verticalmente no RS3. Dimensões no modelo (a); Discretização da malha de elementos finitos (b); e Condições de contorno (c)	92
Figura 52 - Resultados dos modelos de carregamento vertical. Modelo com diâmetro inteiro (a) e Modelo com meio diâmetro (b)	92
Figura 53 – Resultados dos modelos de estaca sendo carregada horizontalmente no RS3. Deslocamentos horizontais (a); Força cortante (b); e Momento fletor (c)	94
Figura 54 - Resultados de deslocamento horizontal da última fase de escavação no RS2 e RS3	98
Figura 55 - Esforços máximos nos grampos sub-horizontais ao longo do paramento	98
Figura 56 - Coeficiente K a partir dos resultados do RS2 e RS3	99
Figura 57 - Gráfico de K em função da profundidade (Clouterre, 1991)	100
Figura 58 - Deslocamentos horizontais finais com e sem GV, com parâmetros de solo de Gerscovich et al. (2005).....	101

Figura 59 - Modelo base para a análise de sensibilidade do solo	103
Figura 60 - Influência de E e c nos deslocamentos horizontais finais	104
Figura 61 - Perfil de deslocamentos horizontais com e sem grampo vertical. E=8MPa e coesão de 10kPa; E=25MPa e coesão de 30kPa	105
Figura 62 - Influência de E e ângulo de atrito nos deslocamentos horizontais finais.....	106
Figura 63 - Perfil de deslocamentos horizontais com e sem grampo vertical. E=8MPa e ângulo de atrito de 24°; E=25MPa e ângulo de atrito de 36°	106
Figura 64 - Variação porcentual de parâmetros x $\Delta\delta_{hmax}$ (mm).....	107
Figura 65 - Variação porcentual de parâmetros x $\Delta\delta_{hmax}$ (%)	108
Figura 66 - Deslocamento horizontais sem grampo vertical	110
Figura 67 - Deslocamento verticais sem grampo vertical.....	111
Figura 68 - Detalhe esquemático da obtenção de β e ϵh	111
Figura 69 – Influência de Lv/H e diâmetro do GV no δ_{hmax}	112
Figura 70 - Influência de Lv/H e diâmetro do GV no δ_{vmax}	113
Figura 71 - Análise de danos devido à escavação - GV com diferentes comprimentos de ficha	114
Figura 72 - Influência da inclinação do GV e diâmetro do GV no δ_{hmax}	116
Figura 73 - Influência da inclinação do GV e diâmetro do GV no δ_{vmax}	117
Figura 74 - Análise de danos devido à escavação - GV com diferentes inclinações.....	118
Figura 75 - Perfil de deslocamento vertical sem grampo vertical e com grampo vertical de 10 cm e 10° de inclinação	119
Figura 76 - Perfil de deslocamentos horizontais sem grampo vertical e com grampo vertical de 10 cm e 10° de inclinação	119
Figura 77 - Modelo com duas linhas de grampos verticais	121
Figura 78 - Modelo com três linhas de grampos verticais.....	121
Figura 79 - Influência da quantidade de linhas e diâmetro do GV no δ_{hmax}	123
Figura 80 - Influência da quantidade de linhas e diâmetro do GV no δ_{vmax}	124
Figura 81 - Análise de danos devido à escavação – diferentes linhas de GV	124
Figura 82 - Influência de Lh/H e diâmetro do GV no δ_{hmax}	127

Figura 83 - Influência de Lh/H e diâmetro do GV no $\delta_{v\max}$	128
Figura 84 - Análise de danos devido à escavação – diferentes comprimentos de grampos sub-horizontais (Lh).....	129
Figura 85 - Modelo com espaçamento horizontal entre GV com 1,5m (a) e 3,0m (b)....	130
Figura 86 - Influência de espaçamento horizontal e diâmetro do GV no h máx	131
Figura 87 - Influência de espaçamento horizontal e diâmetro do GV no v máx	132
Figura 88 - Análise de danos devido à escavação – diferentes espaçamentos horizontais de grampos verticais	133
Figura 89 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 1	134
Figura 90 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 2	134
Figura 91 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 3	135
Figura 92 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 4	135
Figura 93 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais – Nível 5	135
Figura 94 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 6	136
Figura 95 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 7	136
Figura 96 - Relação de deslocamento horizontal máximo e profundidade da escavação - Modelos numéricos com e sem GV	140
Figura 97 - Relação de deslocamento horizontal máximo e profundidade da escavação – Presente estudo e casos de obras	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de análises de solo grampeado (Abramento, Koshima, e Zirlis, 1998)	38
Tabela 2 – Limites de deslocamentos em solo grampeado (adaptado Clouterre, 1991) ...	41
Tabela 3 - Valores limites de deformações e recalques (Poulos, Carter e Small, 2001) ...	68
Tabela 4 - Recomendações de recalques máximos indicadas por diferentes autores (Milititsky, 2016)	68
Tabela 5 - Limites de deslocamentos horizontais de solo grampeado segundo FHWA (2015)	70
Tabela 6 - Parâmetro geotécnicos adotados por Gerscovich et al. (2005).....	71
Tabela 7 - Disposição dos solos da Bacia Sedimentar de São Paulo (Grandis e Marzionna, 2012).....	79
Tabela 8 - Parâmetros de interesse das principais camadas de solo da região de São Paulo (Grandis e Marzionna, 2012).....	80
Tabela 9 - Parâmetros de solo adotados para a análise de sensibilidade do solo	81
Tabela 10 - Variação porcentual dos parâmetros da argila porosa vermelha mole a média	81
Tabela 11 - Parâmetros do elemento de viga para os grampos verticais	85
Tabela 12 - Resistência máxima dos grampos verticais por atrito lateral	86
Tabela 13 - Limite superior e inferior do solo e variação de k_s	90
Tabela 14 - Valor de k_s mínimo e máximo	91
Tabela 15 - Propriedades da modelagem com elemento Forepole	93
Tabela 16 - Propriedades da modelagem com elemento Beam	93
Tabela 17 - Resumo dos deslocamentos horizontais com a inclusão de grampo vertical	102
Tabela 18 - Variação de coesão e módulo de elasticidade	103
Tabela 19 - Variação de ângulo de atrito e módulo de elasticidade	105
Tabela 20 – Parâmetros de solo para as análises paramétrica do grampo vertical	109
Tabela 21 - Resumo de resultados do modelo sem grampo vertical, utilizando parâmetros de solo da Tabela 20	110
Tabela 22 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com diferentes comprimentos de GV	114

Tabela 23 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com diferentes inclinações de GV	118
Tabela 24 - Resultado de deformação horizontal para o caso com grampo vertical de 10 cm com 10° de inclinação	120
Tabela 25 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com diferentes linhas de GV	125
Tabela 26 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com grampo vertical e diferentes comprimentos de Lh.....	129
Tabela 27 - Distorção angular e deformação horizontal com diferentes espaçamentos horizontais de grampos verticais	133
Tabela 28 - Resumo dos resultados da análise paramétrica do grampo vertical	137
Tabela 29 - Resultados de deslocamentos a partir de modelagem numérica na literatura técnica sobre utilização de grampos verticais em solo grampeado	139

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
DR	Deflexão proporcional
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
E.R.R	Estacas raiz reticuladas
GV	Grampo vertical
H	Altura do paramento de solo grampeado
HS	Hardening soil
HSsmall	Hardening Soil with Small Strain Stiffness
MC	Mohr-coulomb
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
NATM	New austrian tunneling method
q_s	Resistência ao arrancamento do grampo
T	Esforço máximo de arrancamento
D	Diâmetro do furo do grampo
N_{spt}	Número de golpes do ensaio SPT.
L_p	Comprimento ancorado do grampo sub-horizontal na zona passiva
δ_h	Deslocamento horizontal
δ_v	Deslocamento vertical
κ	Coefficiente de amortecimento
λ	Estimativa de distância de deslocamentos verticais
E	Módulo de Young
K_0	Coefficiente de Empuxo no Repouso
Θ	Mudança angular em relação a uma linha horizontal
B	Distorção angular
ω	Rotação de um corpo rígido
Eh	Deformação horizontal
$\sigma_{aço}$	Tensão de escoamento do aço
$E_{aço}$	Módulo de Young do aço
$G_{injeção}$	Módulo cisalhante da injeção de nata de cimento
N	Coefficiente de Poisson
γ	Peso específico natural do solo
C	Coesão efetiva do solo
ϕ	Ângulo de atrito do solo
ψ	Ângulo de dilatação do solo
F_e	Força axial do grampo sub-horizontal
A	Área da seção transversal do grampo sub-horizontal

Δ_{ue}	Aumento do comprimento do grampo sub-horizontal
F_{yield}	Resistência máxima do elemento Fully Bonded
F_{res}	Resistência residual do elemento Fully Bonded
E_{eq}	Módulo de elasticidade equivalente
F_t	Resistência a tração do grampo
f_{yk}	Tensão de escoamento do aço
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
σ_p	Tensão de pré-adensamento
Cc	Índice de compressão
e0	Índice de vazios inicial
I	Módulo de Inércia
$T_{m\acute{a}x}$	Resistência axial máxima do elemento Forepole
$\tau_{m\acute{a}x}$	Resistência ao cisalhamento do contato solo-forepole
σ_n	Tensão normal
A	Adesão solo-forepole
k_n	Rigidez normal
k_s	Rigidez axial
Q	Resistência máxima do grampo vertical por atrito lateral
D_{ef}	Porcentagem de deformação em relação ao diâmetro do grampo
S_v, S_h	Espaçamento vertical e horizontal entre os grampos
γ_z	Tensão vertical efetiva no ponto de máxima tensão do grampo
$\cos \theta$	Inclinação do grampo sub-horizontal
δ_{hmax}	Deslocamentos horizontais máximos finais
$\Delta\delta_{hmax}$	Redução absoluta de deslocamentos horizontais
$\Delta\delta_{hmax} \%$	Redução porcentual de deslocamentos horizontais
L_v	Comprimento do grampo vertical
L_h	Comprimento do grampo sub-horizontal

1 INTRODUÇÃO

Solo grampeado é uma técnica de reforço de solo que visa estabilizar taludes naturais ou escavações através da inserção de reforços (grampos) no maciço de solo em conjunto da aplicação de um revestimento superficial de concreto projetado armado.

A técnica é decorrente da evolução da solução do NATM (*New Austrian Tunneling Method*) (Ortigão, Zirlis e Palmeira, 1993) e parte do pressuposto que deve haver uma deformação no maciço para que haja distribuição de tensões e, conseqüentemente, o desenvolvimento do atrito lateral entre os grampos e o solo. Os grampos, neste caso, são denominados elementos passivos.

Apesar da relação direta com os deslocamentos no maciço, no que tange ao dimensionamento, os métodos de análise comumente utilizados são baseados nos conceitos de Equilíbrio Limite, sendo o solo considerado como um corpo rígido e possibilitando a obtenção de fatores de segurança. Portanto, os deslocamentos na estrutura global, através de análises tensão-deformação, não são previstos.

As análises tensão-deformação são importantes principalmente em casos de paramentos verticais – onde o ângulo entre a cota de implantação do empreendimento e a face do paramento é de 90° ou próximo disso - de altura significativa e/ou em solos deformáveis onde os deslocamentos máximos nas estruturas lindeiras à escavação são restritivos. Conforme relatado por Lima, Gerscovich e Sayão (2003), a condição mais desfavorável em termos de deslocamentos em solos grampeados é em paramentos verticais.

Como forma de reforçar o solo e reduzir os deslocamentos em paramentos verticais algumas soluções podem ser utilizadas tais como (Shiu e Chang, 2005; Zirlis e Azzi, 2000): redução do espaçamento horizontal e vertical entre os grampos; aumento do comprimento dos grampos na porção superior do paramento; e utilização de grampos injetados.

Mesmo com as soluções mencionadas, o solo grampeado é uma obra descensional que tem como característica a elevada produtividade de escavação acarretando, assim, em um descarregamento lateral do maciço e redução de rigidez do mesmo, situação que pode gerar deslocamentos significativos na estrutura. Nesse sentido, Pitta, Souza, & Zirlis (2013) relatam a importância da utilização de grampos verticais previamente ao início da escavação junto ao alinhamento da contenção a fim de reduzir esses deslocamentos e aumentar a produtividade da

obra. Destaca-se também o aumento da segurança durante a escavação com a utilização do grampo vertical. Tal solução é tratada como um reforço de solo e pode ser vista em casos de obras como Alberto, Zirlis, George e Teles (2008), Hosken (2003), Pitta, Barbosa e Assis (2017), Teixeira *et al.* (2005).

Apesar da utilização de grampos verticais, há uma lacuna do conhecimento no que se refere ao estudo paramétrico com diferentes comprimentos, espaçamento, inclinação e posicionamento de acordo com diferentes tipos de solos, assim como análises numéricas sobre sua influência nos deslocamentos, ficando, portanto, dependente da experiência da equipe projetista e/ou do executor sua adoção.

1.1 Justificativa

O solo grampeado é muito utilizado para reforço de escavações, possuindo vantagens técnicas e econômicas. Apesar desse tipo de solução possuir modelos e técnicas empíricas para seu dimensionamento, a utilização de grampos verticais como adaptação da solução original ainda é dependente da experiência tanto da empresa executora quanto do projetista o qual recomenda sua utilização.

Apesar do empirismo, resultados de campo demonstram a efetividade da utilização de grampos verticais para o aumento de rigidez da face do paramento, assim como do maciço de solo e na redução de deslocamentos totais durante e após a fase de escavação. Portanto, constata-se que em virtude da falta de estudos específicos e a efetividade de campo, ainda são necessários maiores estudos sobre o tema, possibilitando, assim, que se tenha maior previsibilidade do uso dessa técnica.

1.2 Objetivos

O principal objetivo dessa pesquisa é analisar numericamente a influência da utilização de grampos verticais nos deslocamentos de solo grampeado.

Objetivos específicos:

- 1) Quantificar os deslocamentos de uma estrutura de solo grampeado com e sem a utilização de grampos verticais;
- 2) Comparar os deslocamentos com a adoção de diferentes parâmetros de grampos verticais e tipos de solos;

- 3) Analisar as possíveis reduções de danos às estruturas adjacentes à escavação com a utilização de grampos verticais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Método construtivo

O método construtivo do solo grampeado, em linhas gerais, pode ser dividido em duas categorias:

i) Escavações

Neste caso, a metodologia se inicia através da escavação faseada descendente do solo em profundidades predefinidas em projeto. Posteriormente, são escavados os furos para a instalação dos grampos. Os grampos, por sua vez, são executados através da inserção de barras de aço nos furos e injeção de nata de cimento com ou sem pressão pré-definida. Finalmente, finaliza-se o paramento através da execução do revestimento com concreto projetado. A Figura 1 ilustra a metodologia.

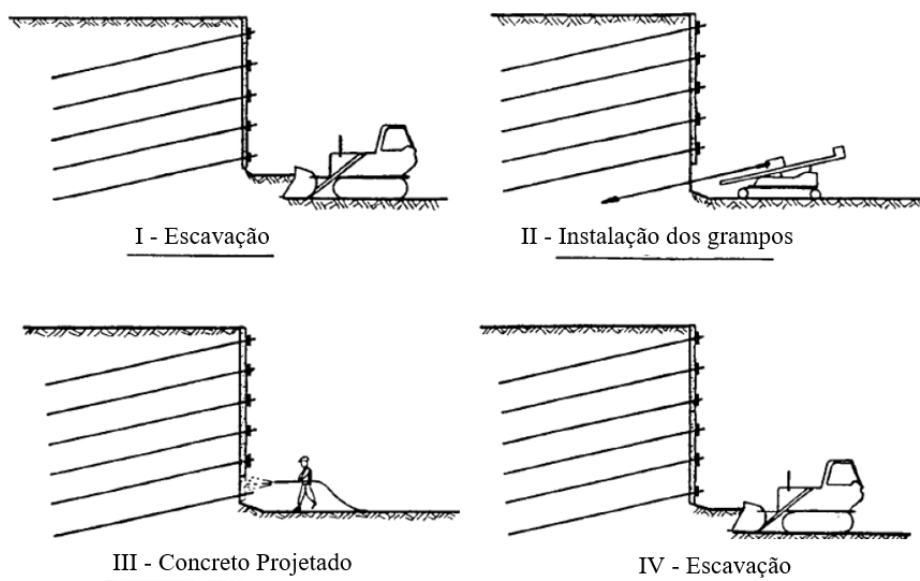


Figura 1 - Fases construtivas de solo grampeado em corte (Clouterre, 1991)

ii) Taludes naturais

Similar ao caso anterior, porém sem a necessidade de escavações significativas em bancadas. Consiste, assim, no reforço de taludes naturais através da execução dos chumbadores e posterior instalação do revestimento de concreto projetado. A Figura 2 ilustra a metodologia.



Figura 2 - Reforço de taludes naturais com solo grampeado (Solotrat, 2020)

2.2 Elementos do solo grampeado

O comportamento do solo grampeado depende diretamente da interação dos elementos que o compõe. Conforme ilustrado na Figura 3, os principais elementos são:

- Barra: elemento que pode ser constituído de aço, fibras de vidro resinada ou materiais similares.
- Calda de cimento: mistura de água e cimento em uma proporção determinada que pode ser introduzido no furo através de múltiplas injeções ou simples preenchimento por gravidade.
- Revestimento: elemento de finalização em concreto projetado armado.

O comportamento desses elementos e a importância de cada um serão discutidos nos próximos tópicos.

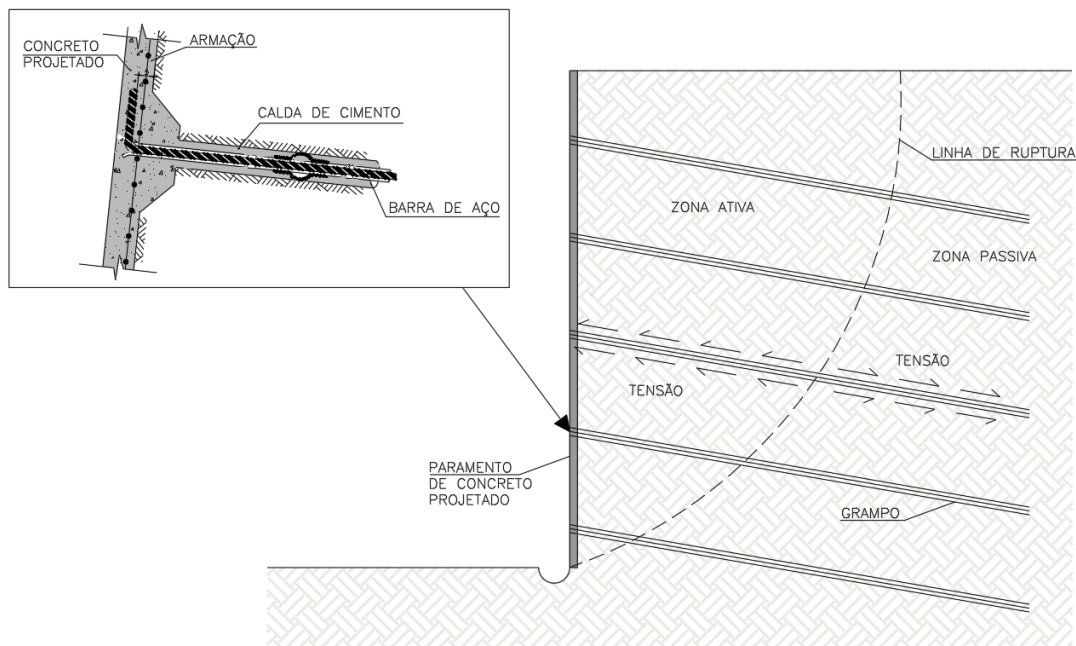


Figura 3 - Componentes principais do solo grampeado (Fonte: autor)

Importante ressaltar que existem outros elementos como produtos para proteção de corrosão, elementos de drenagem, componentes de conexão grampo e paramento, que também fazem parte do sistema do solo grampeado, mas que não serão abordados na presente pesquisa.

2.3 Comportamento do Solo Grampeado

O solo grampeado iniciou-se como uma solução empírica e ao longo do tempo seu comportamento foi estudado por diversos autores através de análises numéricas, instrumentações e ensaios em modelos em escala natural. Dentre os diversos trabalhos pode-se citar (*apud* Erlich e Zirlis, 2016): o programa francês denominado *Clouterre* (Clouterre, 1991); na Alemanha o programa que analisou modelos em escala real e descrito por Stocker, Gudegus e Gassler (1979); e no Canadá um programa foi conduzido por Shen (1981). Até 1979 os resultados e discussões sobre a solução ainda estavam no âmbito local dos respectivos países, sendo que um simpósio realizado em Paris proporcionou um intercâmbio de ideias entre os pesquisadores (Erlich e Zirlis, 2016).

Como forma de abordar os principais aspectos do comportamento do solo grampeado, os tópicos a seguir descrevem as particularidades referentes a: (1) interação solo-grampo; (2) distribuição de tensões no grampo; (3) estados limites.

2.3.1 Interação solo-grampo

O solo logo após uma escavação sofre um desconfinamento lateral e recalques superficiais, tendendo a se movimentar em direção à escavação. Com o intuito de evitar esses deslocamentos, e seguindo o procedimento de execução do solo grampeado, são realizadas perfurações no solo para a instalação de barras de aço e posterior preenchimento do furo com calda de cimento, formando, dessa forma, o grampo. Os grampos, por sua vez, geram no solo esforços resistentes de tração e/ou cisalhamento (Ortigão, Zirlis, e Palmeira, 1993). A Figura 4 demonstra o caso (a) onde os grampos têm como princípio a resistência ao cisalhamento e o caso (b) onde estes são solicitados primordialmente por esforços de tração.

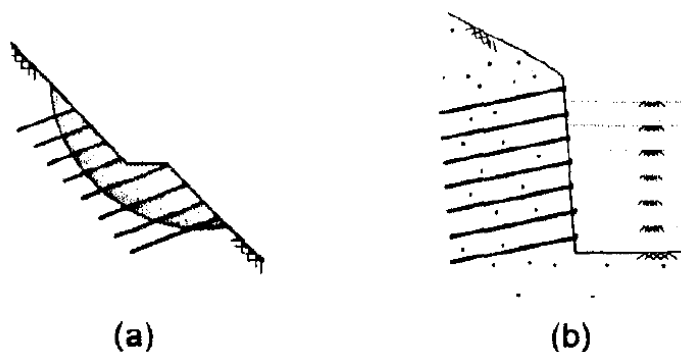


Figura 4 - Esforços nos grampos: (a) esforços de cisalhamento; (b) esforços de tração (Ortigão, Zirlis, e Palmeira, 1993)

Após a finalização da execução dos grampos, no talude exposto é aplicado o revestimento de concreto projetado com armação que pode ser de telas de aço ou fibras de polietileno ou aço. O revestimento não influencia diretamente na estabilidade global do maciço, sendo, portanto, um elemento de unificação dos grampos e de estabilidade local do solo (Erlich e Zirlis, 2016).

A interação solo-grampo inicia-se logo nos primeiros estágios de escavação. O solo aplica uma pressão no paramento o qual transfere os esforços para os grampos. Estes, por sua vez, interagem com o solo através das tensões de cisalhamento geradas entre o solo e a calda de cimento. Dessa forma, a interação inicia-se com a mobilização dos grampos após deformações no solo que ocorrem concomitantemente com a evolução da escavação das linhas inferiores de grampos. Vale ressaltar que após análises de instrumentações em solos grampeados, Clouterre (1991) relatou que essas deformações são da ordem de milímetros. Em situações de reforço em taludes naturais ou pré-escavados a mobilização dos grampos pode ser diferenciada em comparação com situações que ocorrem escavações após a instalações dos grampos. Conforme

relatado por Erlich e Zirlis (2016), nesses casos, a mobilização poderia ocorrer por efeitos posteriores como variação da umidade do terreno devido à chuvas, por exemplo.

A interação solo-grampo é quantificada pelo valor da resistência ao arrancamento do grampo (q_s) que pode ser expressa pela equação (1):

$$q_s = \frac{T}{\pi \times D \times L} \quad (1)$$

Onde:

- T = esforço máximo de arrancamento (kN);
- D = diâmetro do furo (m);
- L = comprimento do grampo (m).

A unidade resultante do q_s é kPa.

Para obtenção do valor de q_s a forma mais recomendada é através de ensaios de arrancamento. Estes ensaios são realizados com macacos hidráulicos acoplados nos grampos já executados e que aplicam um esforço de tração contrário ao maciço, conseqüentemente, arrancando o grampo.

Diversos autores realizaram estudos empíricos sobre valores de q_s de acordo com tipos de solos e grampos. Dentre estes, pode-se destacar Ortigão (1997) que correlacionou os valores de q_s com o número de golpes de SPT através da equação (2):

$$q_s = 50 + 7,5 \times N_{spt} \quad (2)$$

Onde:

- N_{spt} = número de golpes do ensaio SPT.

A unidade resultante do q_s é kPa.

Springer (2006) realizou diversos ensaios de arrancamento em grampos executados em solo residual (maduro ou jovem) e em rocha alterada de gnaiss na cidade de Niterói, Rio de Janeiro, e através dos resultados, recomendou a equação (3) para obtenção do q_s :

$$q_s = 45,12 \times \ln(N_{spt}) - 14,99 \quad (3)$$

Onde:

- N_{spt} = número de golpes do ensaio SPT.

A unidade resultante do q_s é kPa.

Outros recomendações de obtenção da resistência ao arrancamento de grampos podem ser encontradas em Clouterre (1991) e Bustamante & Doix (1985), por exemplo.

2.3.2 Distribuição de tensões no grampo

Estando o grampo devidamente aderido ao solo por todo seu comprimento e mobilizado, com a evolução da escavação o maciço divide-se em duas zonas: ativa e passiva, conforme ilustrado na Figura 5.

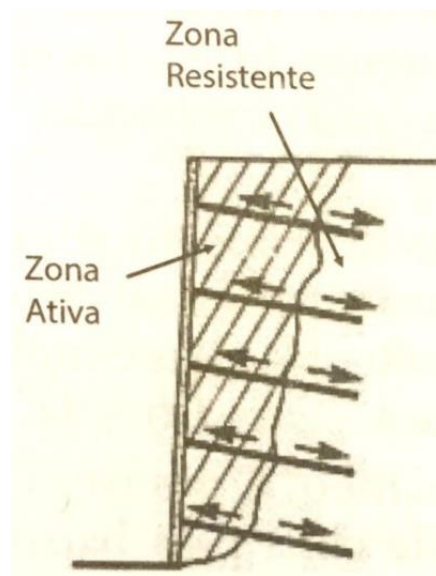


Figura 5 - Zona ativa e passiva de solo grampeado (Erlich e Zirlis, 2016)

A zona ativa é aquela entre o paramento de concreto projetado e a superfície de ruptura, onde a tendência do maciço é de deslizamento e a interação solo-grampo gera esforços de

cisalhamento em direção à escavação. A zona passiva é aquela onde os grampos são ancorados e os esforços de cisalhamento são opostos à direção da escavação. Os grampos têm como função unificar a zona ativa, potencialmente instável, na zona passiva, resistente.

O posicionamento da linha de ruptura é de complexa definição e varia de acordo com a evolução da escavação, assim como a contribuição dos grampos no equilíbrio global do maciço de solo. Além da delimitação da zona ativa e zona passiva, a linha de ruptura também define o posicionamento dos esforços de tensão axiais gerados nos grampos durante a escavação, que contribuirão para a aderência dos mesmos na zona passiva. Efeitos de flexão composta também ocorrem, porém, com um menor efeito comparado aos de tração (Clouterre, 1991) e, normalmente, não são considerados em projeto.

A Figura 6 ilustra a contribuição dos esforços dos grampos na estabilidade do maciço. Nesta, observa-se que a contribuição dos grampos superiores na estabilidade do maciço é relativamente pequena comparada aos grampos inferiores, por conta do comprimento ancorado na zona passiva (L_p) (Federal Highway Administration, 2015).

Baseando-se em métodos de equilíbrio limite, os esforços dos grampos aplicados à linha de ruptura aumentarão a resistência ao cisalhamento do maciço. Além disso, o mesmo produzirá esforços fletores e estabilizantes que serão incorporados nos métodos de análise de equilíbrio limite (Pun, Cheung e Shum, 2009).

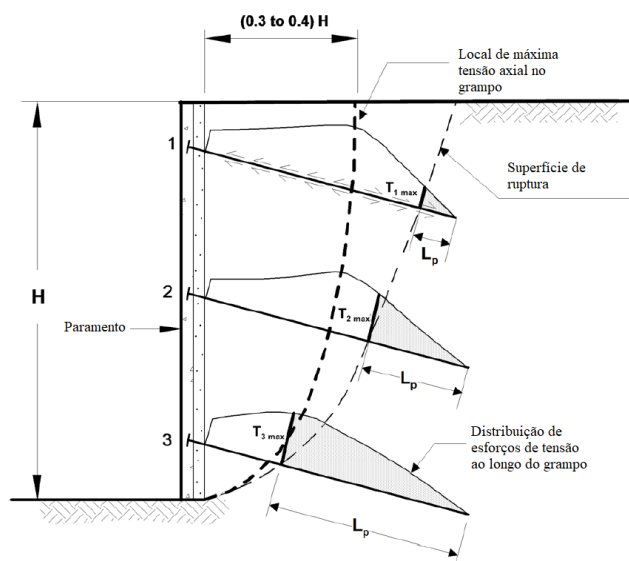


Figura 6 - Distribuição dos esforços de tensão axial nos grampos (adaptado FHWA, 2015)

2.3.3 Estados limites

O solo grampeado sendo uma estrutura deve atender requisitos mínimos de utilização que são divididos em: (1) estado limite último e (2) estado limite de serviço.

A seguir serão discutidos alguns aspectos importantes na análise de solos grampeados considerando os dois estados limites citados.

2.3.3.1 Estado limite último (ELU)

O método mais utilizado para o dimensionamento de solo grampeado, no que se refere à estabilidade, é o método de equilíbrio limite que supõe que o maciço é um corpo rígido que se deslocará ao longo de uma superfície de ruptura e que através da comparação entre esforços atuantes e resistentes obtêm-se um fator de segurança. Logo, o método avalia somente a condição de colapso, também denominado estado limite último ou estado limite de ruptura.

A definição da superfície de ruptura, a consideração de grampos na análise, o efeito de momentos fletores e o equilíbrio de forças varia entre diversos métodos clássicos. Os principais métodos para solo grampeado estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Métodos de análises de solo grampeado (Abramento, Koshima, e Zirlis, 1998)

Características	Métodos					
	Alemão	Davis	Multicritério	Cinemático	Cardiff	Escoamento
Referência	Stocker <i>et al.</i> , 1979	Shen <i>et al.</i> , 1981	Schlosser, 1983	Juran <i>et al.</i> , 1988	Bridle, 1989	Anthonie, 1990
Análise	Equilíbrio limite	Equilíbrio limite	Equilíbrio limite	Tensões internas	Equilíbrio limite	Teoria de escoamento
Divisão da massa de solo	2 cunhas	2 blocos	Fatias	-	Fatias	Bloco rígido
Fator de segurança	Global	Global	Global e local	Local	Global	Global
Superfície de ruptura	Bilinear	Parabólica	Circular ou poligonal	Espiral log	Espiral log	Espiral log
Grampo resistem a: Tração Cisalhamento Flexão	x	x	x x x	x x x	x x x	x
Inclinação da parede	Vertical ou inclinada	Vertical	Qualquer	Vertical ou inclinada	Vertical ou inclinada	Vertical ou inclinada
No. de camadas de solo	1	1	Qualquer	1	1	1

O método de equilíbrio limite é amplamente utilizado pois, além de ser de complexidade relativamente baixa, os poucos parâmetros de solo necessários como peso específico; coesão e ângulo de atrito, são obtidos de formas simples e direta. Além disso, esses métodos já foram incorporados em diversos *softwares* amplamente utilizados pela comunidade geotécnica.

No entanto, tratando-se de solos grampeados que são estruturas onde as grampos dependem diretamente de movimentações no solo para sua mobilização, o conhecimento dos deslocamentos na estrutura é fundamental (Jiménez, 2008). Assim sendo, análises considerando o estado limite de serviço da estrutura, onde os deslocamentos são previstos, são cada vez mais importante.

2.3.3.2 Estado limite de serviço (ELS)

Ao contrário do ELU, o ELS se refere a uma condição onde o funcionamento ou durabilidade da estrutura não atende mais os requisitos básicos de utilização. No caso de solo grampeado, o ELS se refere, sobretudo, aos deslocamentos na estrutura, pois muitas vezes este é executado em ambientes urbanos, onde as estruturas lindeiras são sensíveis aos deslocamentos.

O comportamento dos deslocamentos em escavações de solo grampeado pode ser influenciado por diversos aspectos, tais como (Clouterre, 1991): velocidade da escavação; espaçamento entre grampos e altura da escavação entre as linhas de grampos; comprimento dos grampos; fator de segurança global; relação entre comprimento dos grampos (L) e altura do paramento (H); inclinação dos grampos; capacidade de carga do solo na fundação.

O comportamento de estruturas de solo grampeado foi estudado por vários autores ao longo do seu desenvolvimento através de monitoramento de modelos em laboratório ou campo.

Guilloux e Schlosser (1982) relatam alguns casos de obras de solo grampeado vertical na França e os respectivos comportamentos das estruturas em relação aos deslocamentos. Segundo os autores, deslocamentos horizontais na face de concreto são esperados durante a construção por conta da mobilização dos grampos durante a interação com o solo. Além disso, informam que os valores encontrados de deslocamentos horizontais foram da ordem entre $H/1000$ e $3H/1000$, sendo H a altura do paramento, conforme a Figura 7 demonstra. Os autores concluem que uma atenção especial deva ser dada ao estudo das deformações, pois os deslocamentos necessários para obter os valores máximos de resistência, respectivamente, no solo e interação solo-grampo, podem variar substancialmente.

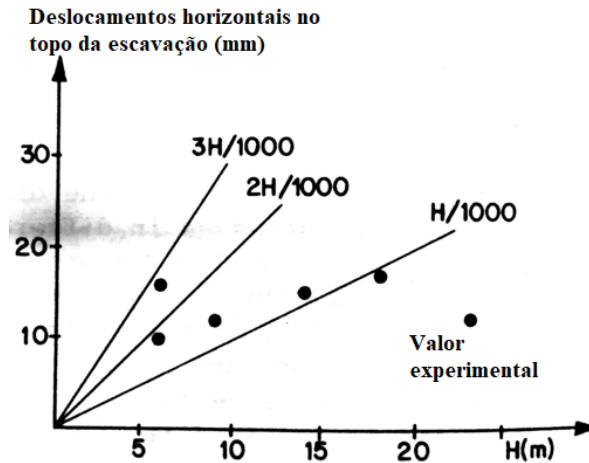


Figura 7 - Deslocamentos horizontais na face de solo grampeado (adaptado Guilloux e Schlosser, 1982)

Cartier e Gigan (1983) monitoraram duas escavações em solo grampeado verticais utilizando um método denominado “*Hurpinoise*”, o qual são inseridos perfis metálicos em “L” no solo em vez de barras de aço. Uma das escavações tinha 11,6 m e a outra 5,5 m de altura. O solo local era predominantemente arenoso, que segundo os autores influencia diretamente no comportamento do arrancamento dos grampos por conta do confinamento e dilatância de areias compactas, aumentando, dessa forma, a resistência ao arrancamento. Os resultados do monitoramento indicaram deslocamentos horizontais da ordem de 14,0 mm no paramento de 11,6 m e 6,0 mm no paramento de 5,5 m. Notou-se que os maiores deslocamentos se localizaram no topo do paramento. Os autores informam que, apesar dos resultados positivos do uso de solo grampeado, análises de deformação são necessárias para compreender a interação solo-grampo e analisar de uma forma mais adequada as observações nas estruturas.

Guilloux, Notte e Gonin (1983) monitoraram uma escavação grampeada vertical provisória de 14,0 m de altura na França. Alguns resultados encontrados foram:

- A distribuição dos esforços de tensão nos grampos não é uniforme;
- A localização do ponto máximo de tensão é difícil de prever, porém, aparentemente, se localiza próximo à face do paramento;
- Os esforços para mobilização dos grampos foram pequenos da ordem de 100 kN, enquanto a resistência das barras era da ordem de 400 kN;
- Os deslocamentos horizontais ficaram entre 1 e 2 cm, valores próximos do esperado de $H/1000$.

Clouterre (1991) obteve resultados similares aos apresentados por Guilloux e Schlosser (1982). Os deslocamentos tanto horizontais quanto verticais no topo das escavações em diferentes tipos de solos ficaram entre $H/1000$ e $4H/1000$, conforme ilustrado na Figura 8.

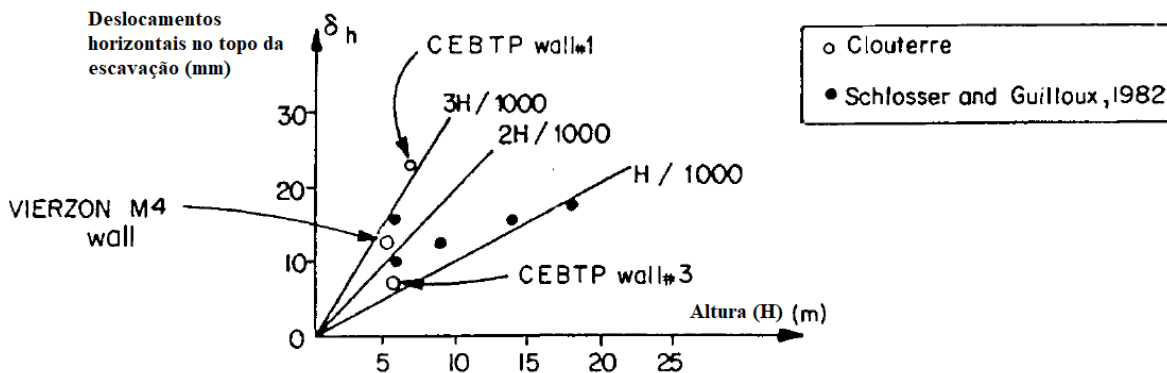


Figura 8 - Deslocamentos horizontais em solo grampeado (adaptado Clouterre, 1991)

Com base nos resultados, Clouterre (1991) recomenda os limites para deslocamentos horizontais e verticais resumidos na Tabela 2. Importante salientar que os valores de deslocamentos horizontais e verticais no topo do paramento foram praticamente os mesmos.

Tabela 2 – Limites de deslocamentos em solo grampeado (adaptado Clouterre, 1991)

Variável	Rochas alteradas e solos rígidos	Solos arenosos	Solos finos
$(\delta_h = \delta_v)$	$H/1000$	$2H/1000$	$4H/1000$
κ	0,8	1,25	1,5

Onde:

- $\delta_h = \delta_v =$ deslocamento horizontal ou vertical (m);
- $H =$ altura do paramento (m);
- $\kappa =$ coeficiente de amortecimento.

O coeficiente κ é utilizado na equação (4) a seguir:

$$\lambda = H \times (1 - \tan \eta) \times \kappa \quad (4)$$

A partir desta obtém-se uma estimativa da distância (λ) atrás da face do paramento onde os deslocamentos, decorrente da escavação, são nulos. A Figura 9 ilustra a aplicação equação (4).

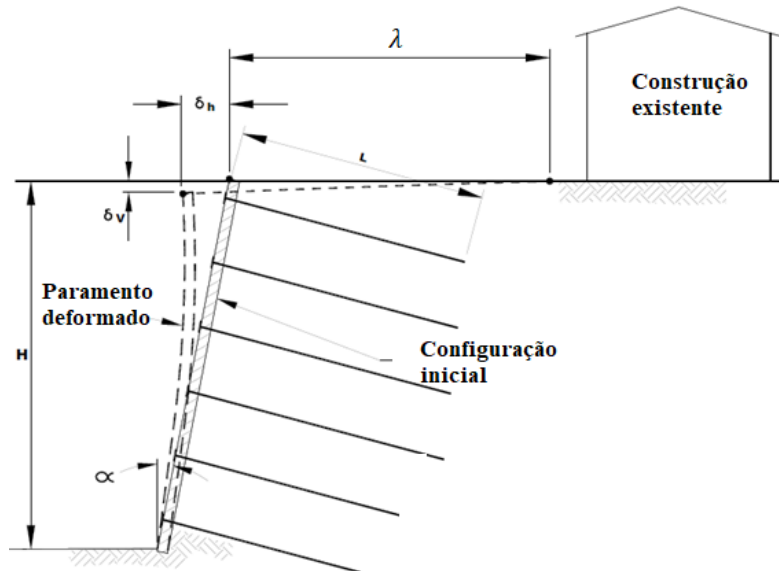


Figura 9 - Ilustração da deformação de paramentos de solo grampeado (adaptado FHWA, 2015)

Em se tratando da experiência brasileira sobre o desempenho de estruturas em solo grampeado, Pitta, Souza, & Zirlis (2003) comparam medidas de deformações da literatura internacional, algumas citadas anteriormente, com um caso de obra de solo grampeado executado na Beneficência Portuguesa – São Paulo – SP. Os dados estão resumidos nas Figuras 10 e 11. Nota-se que os valores obtidos na crista do talude são dispersos, entretanto, dentro do intervalo proposto por Clouterre (1991).

Referência		Ano	Altura(m)	Def. horiz./altura(%)
Guilloux(12)	■	1980	14,0	0,11
Shen-Samaritan (16)		1981	13,7	0,29
Shen-Davis(17)		1981	9,2	0,17
Gassler(11)		1981	6,0	0,25
Blondeau & Ledeuil(12)		1982	16,5	0,15
Nicholson(12)		1982	9,1	0,04
Nicholson(12)		1985	12,3	0,08
Clouterre(10)		1991	5,0	0,21
Benef. Portuguesa - A3		X	2002	10,42
Benef. Portuguesa - B2	10,50			0,05
Benef. Portuguesa - C2	12,16			0,20
Benef. Portuguesa - D1	13,50			0,04

Figura 10 - Valores da % de deformação horizontal com a altura de corte (Pitta, Souza e Zirlis, 2003)

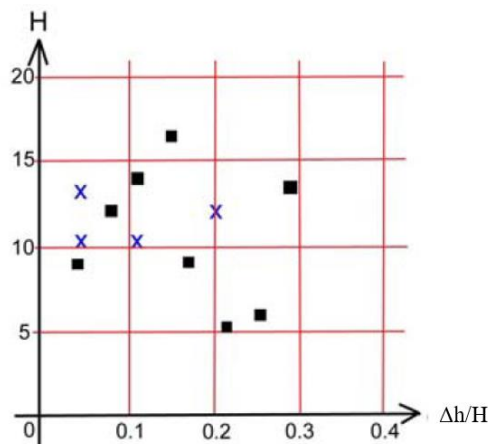


Figura 11 - Comparação dos valores de % de deformação horizontal com a altura de corte (Pitta, Souza e Zirlis, 2003)

Apesar dos diferentes estudos já realizados tentando compreender o comportamento de deslocamentos de solos grampeados de acordo com diferentes tipos de solos, sua obtenção ainda é dependente do empirismo e acompanhamento diário de obra através de monitoramento. No entanto, análises tensão-deformação podem ser uma ferramenta benéfica para controles de instrumentações e estimativa de comportamento pré-execução, ou mesmo retroanalisar obras finalizadas.

2.3.4 Análises tensão-deformação

As análises tensão-deformação são possíveis através da utilização de diversas técnicas numéricas como Método dos elementos finitos (MEF) e Método das Diferenças finitas (MDF), por exemplo, que têm como base a teoria do meio contínuo. Essas análises possibilitam obter as tensões e deslocamentos no solo simulando-o como um meio contínuo. No que se refere aos solos grampeados, diferentes autores simularam escavações tanto em modelos 2D quanto 3D.

Smith e Su (1997) desenvolveram um modelo 3D utilizando os conceitos do MEF, obtendo-se o comportamento dos grampos, a interação solo-grampo, o comportamento do reforço em geral e os mecanismos de ruptura interna e geral. Os autores relatam, primeiramente, que o modelo 3D foi adotado pois o estado plano de deformações em solos grampeados não é totalmente válido, visto que os grampos possuem uma geometria relativamente pequena na terceira dimensão (o diâmetro do grampo), impactando, assim, no comportamento da interação solo-grampo. No caso, eles modelaram uma escavação hipotética com 6,0 m de altura utilizando um modelo

constitutivo elástico perfeitamente plástico com base no critério de Mohr-Coulomb com diferentes tipos de carregamentos externos. Vale ressaltar que apesar de não realizarem uma comparação com levantamentos de campo, os resultados obtidos se assemelham aos trabalhos de campo anteriormente realizados ao estudo.

Lima (2002) desenvolveu um estudo tensão-deformação em solo grampeado em solos residuais do Rio de Janeiro utilizando modelos 2D através do programa FLAC. O modelo constitutivo foi o elástico perfeitamente plástico com base no critério de Mohr-Coulomb. A partir dos resultados, o autor infere que os deslocamentos horizontais são diretamente proporcionais à inclinação do talude, ou seja, em inclinações próximas de 90° os deslocamentos são maiores, sobretudo, no topo da escavação. No caso de modelagens numéricas, recomenda que seja adotada uma condição de contorno adequada, pois a mesma influencia significativamente nos resultados dos deslocamentos horizontais no paramento e sugere que as paredes em estruturas grampeadas sejam modeladas como elementos de viga, por conta do perfil de deslocamento obtido utilizando esse tipo de componente. Uma das principais conclusões do estudo foi que com a diminuição da inclinação do talude de 90° para 80° , ocorre uma diminuição de 75% dos deslocamentos horizontais, conforme a Figura 12 demonstra.

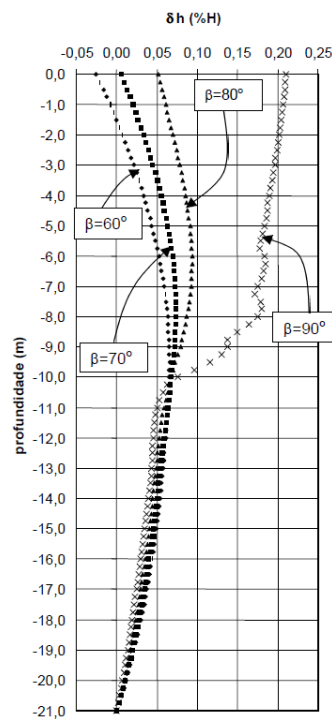


Figura 12 - Influência da inclinação do talude nos deslocamentos de solo grampeado (Lima, 2002)

Gerscovich *et al.* (2005), com base no modelo de Lima (2002), elaboraram análises bidimensionais nos *softwares* PLAXIS e FLAC investigando, assim, os deslocamentos horizontais finais do paramento, influência do tipo de fixação do grampo a parede, influência do tipo de elemento para simulação do grampo e influência do tipo de elemento para simulação da interface. Os autores compararam dois tipos de elementos para a modelagem do grampo: i) cabo, que não possui rigidez a flexão; ii) viga, que possui rigidez a flexão. Já para a fixação do grampo a parede, analisaram a condição de grampo fixo, considerando uma conexão rígida, e a condição de grampo livre, introduzindo um elemento de mola com uma rigidez 500 vezes menor que a rigidez do grampo. Para a interface solo-grampo, analisaram uma condição com fator de redução (R) do critério de resistência de Mohr-Coulomb de 1,0 e outra com 0,6. Os autores concluem que é significativa a influência do tipo de conexão na modelagem, resultando em deslocamento menores para o caso de grampo fixo. Ademais, houve pouca influência a consideração do elemento de interface solo-grampo. E, por fim, não foi significativa a diferença de simulação do grampo com elemento de cabo ou elemento de viga.

Shiu e Chang (2005) em uma análise 2D utilizando o programa FLAC e o modelo constitutivo elasto-plástico com critério de Mohr-Coulomb, analisaram numericamente os efeitos da inclinação, comprimento e resistência a flexão dos grampos no comportamento de solos grampeados. A partir dos resultados, os autores versam:

- Com o aumento da inclinação dos grampos a sua contribuição diminui em termos de estabilidade do maciço. Portanto, recomendam que sejam utilizadas inclinações entre 10° e 20° em relação à face do paramento;
- Em uma escavação por estágios o posicionamento de grampos maiores na porção superior do paramento reduz os deslocamentos na parte superior;
- Por outro lado, grampos maiores na parte inferior contribuem de forma mais efetiva na estabilidade global do maciço, pois seu comprimento na zona passiva é maior em relação aos grampos superiores;
- A resistência a flexão e cisalhamento dos grampos têm pouco efeito no que se refere à estabilidade. Assim, sua contribuição pode ser desconsiderada.

Os quatro estudos citados utilizaram como modelo constitutivo a hipótese do solo comportando-se como material elasto-plástico com critério de ruptura Mohr-Columb. Esse modelo é comum em modelagens numéricas de solos e utiliza parâmetros de solo mais simples como ângulo de atrito, coesão, módulo de elasticidade, coeficiente de poisson, peso específico, ângulo de dilatação e coeficiente de empuxo (Townsend, Anderson e Rahelison, 2001). Apesar da abordagem ser comumente utilizada, outros modelos constitutivos mais avançados podem ser utilizados.

Zhang, Song e Chen (1999) apresentaram um estudo de um modelo 3D de solo grampeado utilizando o modelo constitutivo não linear de Duncan-Chang com algumas adaptações. Este modelo constitutivo foi utilizado pois, segundo os autores, o solo é um material complexo, principalmente em condições de carregamento e descarregamento onde a variação da rigidez é diferente, como em escavações, sendo a relação tensão-deformação não linear mais recomendada. A partir dos resultados, percebe-se que com a utilização de grampos mais longos na porção superior do paramento reduz-se tanto os deslocamentos horizontais quanto verticais nessa região. Além disso, como forma de validar o modelo, comparou-se os resultados da modelagem numérica com os resultados de campo. No geral, os resultados dos deslocamentos horizontais da modelagem numérica se assemelharam com os resultados de campo. Uma ressalva feita pelos autores se trata de algumas diferenças observadas entre a modelagem e resultados de campo nos deslocamentos no topo da escavação, sendo que o modelo apresentou deslocamentos menores. Tal diferença, segundo os mesmos, pode ter ocorrido pela perturbação ocorrida no solo nessa região e o surgimento de fissura de tração, as quais são de difícil modelagem.

Singh e Babu (2010) com o intuito de verificar a influência de outros tipos de modelos constitutivos em modelagens de solos grampeados, realizaram um estudo comparativo entre os modelos Mohr-Coulomb (MC), *Hardening Soil* (HS) e *Hardening Soil with Small Strain Stiffness* (HSsmall). Em termos de levantamento da base da escavação (“*base heave*”), o modelo MC superestimou esses deslocamentos em comparação com os dois outros modelos, resultando no dobro de deslocamentos na fase final de escavação. No que se refere aos deslocamentos horizontais no topo da escavação, houve uma diferença mais significativa no final da escavação, sendo que o MC apresentou deslocamentos menores. Porém essa diferença foi pequena, da ordem de 15 mm, que dependendo do nível de atenção da obra, não é significativo – vide Figura 13. No que tange

às tensões axiais nos grampos, não houve uma diferença significativa nos resultados entre os modelos. Por fim, os autores afirmam que o MC ainda é recomendável mesmo sendo um modelo mais simplificado e que os demais modelos são recomendados em casos de deslocamentos muito pequenos.

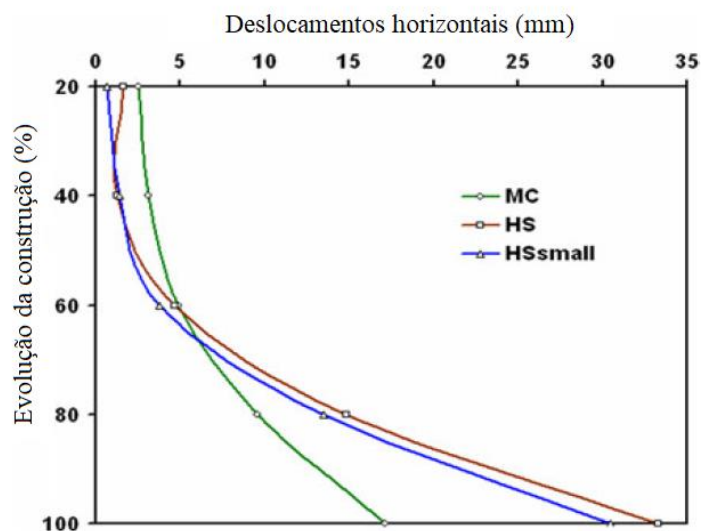


Figura 13 - Comparação dos deslocamentos horizontais (adaptado Singh e Babu, 2010)

Outras análises podem ser encontradas em Briaud e Lim (1997); Ng e Lee (2002); Lima, Gerscovich e Sayão (2004); Cheuk, Ng e Sun (2005); Jiménez (2008) e Fan e Luo (2008).

2.4 Grampos Verticais

No processo de escolha de alguma técnica de contenção ou reforço de solo, diversos aspectos técnico-econômicos devem ser levados em consideração como, por exemplo:

- Disponibilidade de mão de obra;
- Espaço para movimentação e instalação de equipamentos;
- Vibrações nas estruturas vizinhas;
- Estrutura permanente ou provisória;
- Custo total da solução;
- Tempo de execução;
- Controle d'água.

No aspecto estritamente técnico, uma das maiores preocupações durante escavações em ambiente urbano trata-se dos deslocamentos gerados na estrutura de reforço ou contenção e,

consequentemente, nas estruturas lindeiras a mesma. Esses deslocamentos podem ser gerados, dentre outros fatores, pela condição natural de mudança de tensão inicial do maciço de solo, rebaixamento de lençol freático, mudança de rigidez do solo, rigidez do paramento utilizado e perda de material.

A estrutura do solo grampeado possui uma rigidez não muito elevada comparando-se com outros tipos de soluções para contenção de solos como cortina atirantada ou parede de diafragma, por exemplo. E a mesma não é recomendada ser utilizada em solos muito moles ou com baixa coesão e também com nível do lençol freático alto, por conta dos possíveis deslocamentos significativos que podem ser desenvolvidos (Erlich e Zirlis, 2016). Ainda assim, o solo grampeado já se demonstrou uma técnica recomendada mesmo em escavações em ambientes urbanos onde os deslocamentos são restritos, tendo exemplos de obras com mais de 20,0 m de desnível executadas no Brasil e internacionalmente que demonstraram desempenho satisfatório durante e após a execução.

Os principais deslocamentos em obras de solo grampeado ocorrem, sobretudo, durante sua execução por conta da exposição do solo entre a escavação e a instalação dos grampos e jateamento do concreto. Quanto maior o tempo de exposição do maciço maior é a tendência do mesmo se deformar. Para redução dessa exposição, Clouterre (1991) recomenda como medida provisória a escavação do solo entre bermas, conforme a Figura 14 ilustra.



Figura 14 - Escavação do solo entre bermas (Pitta, Souza e Zirlis, 2013)

Outra recomendação feita pelos autores é a instalação de grampos preliminarmente ao início da escavação das bermas a fim de reforçar o solo e reduzir o tempo entre sua exposição e a aplicação do concreto projetado. A Figura 15 exemplifica a solução.

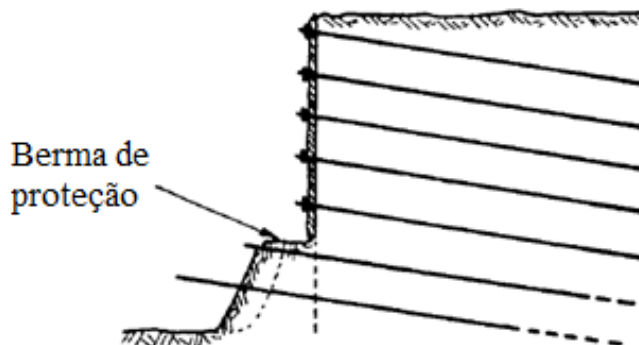


Figura 15 - Execução de grampos preliminarmente ao início da escavação das bermas (adaptado Clouterre, 1991)

Apesar disso, Pitta, Souza, & Zirlis (2013) relatam que a prática de utilização de bermas reduz a produtividade da obra. Nesse sentido, de acordo com os autores, recomenda-se a instalação de grampos verticais preliminarmente ao início da escavação entre os grampos horizontais, localizados próximos ao tardo do paramento, conforme as Figuras 16 e 17.



Figura 16 - Utilização de grampos verticais (Pitta, Souza e Zirlis, 2013)



Figura 17 - Utilização de grampos verticais (adaptado Pitta, Souza e Zirlis, 2013)

O grampo vertical também pode ser executado durante o processo de escavação, caso se verifique alguma anomalia nos deslocamentos da estrutura. Essa situação foi descrita por Teixeira *et al.* (2005) no caso da obra de um Aeródromo em Mococa – São Paulo. O projeto inicial não previa a execução de grampos verticais, entretanto, durante o avanço dos trabalhos surgiram trincas a montante do paramento entre 10 e 20 mm e deformações horizontais maiores que 0,4%H. Sendo assim, como primeira medida, foram instalados grampos verticais, sem inclinação. Mesmo com a solução, surgiram novas trincas e uma nova linha de grampos verticais, agora com inclinação de 20°, foram instalados. Após esses procedimentos, as movimentações foram controladas.

No que se refere à utilização de grampo vertical no mercado brasileiro, em um levantamento realizado por Erlich e Zirlis (2016) com associados da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS) entre Outubro de 2013 e Janeiro de 2014, verificou-se que a maioria dos consultores considerava importante a utilização de grampos verticais preliminarmente a escavação. A sua utilização pode ser vista em casos de obras como Pitta, Barbosa, e Assis (2017), Teixeira *et al.* (2005), Alberto *et al.* (2008) e Hosken (2003).

Em relação à prática internacional, a China é um dos países que mais utiliza a técnica de considerar grampos verticais em conjunto com solo grampeado (Fu, 2015). Porém, além de utilização de grampos verticais, a prática de engenharia geotécnica chinesa adota outros tipos de soluções em conjunto com solo grampeado para reforço de grandes escavações. Quando utilizam soluções de reforço além daquelas previstas em solo grampeado padrão, denominam a estrutura

como solo grampeado composto (*composite soil nailing wall*). Fu (2015) relata que na China são utilizados sete tipos de solos grampeados compostos, resumidos na Figura 18. Ademais, na China também existe uma norma específica sobre solos grampeados compostos, denominado “*Technical Code for Composite Soil Nailing Wall in Retaining and Protection of Excavation, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*”.

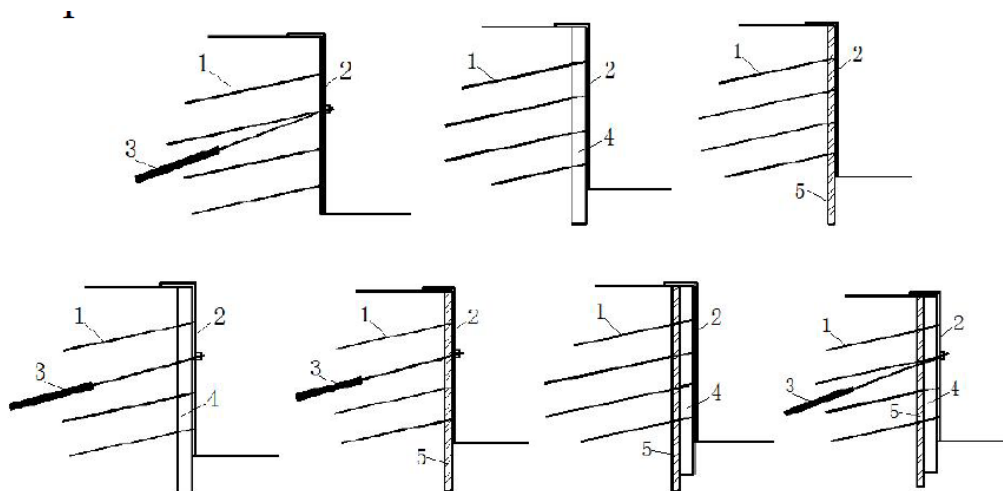


Figura 18 - Tipos de solo grampeado composto. 1) Solo grampeado; 2) Concreto projetado; 3) Tirante; 4) cortina de reforço com nata de cimento; 5) micro estaca (adaptado Fu ,2015)

Como pode ser observado na Figura 18, as soluções podem variar, sendo que a que mais se assemelha a técnica de uso de grampo vertical é a opção de utilização de micro estaca em conjunto com solo grampeado, que são o mesmo tipo de reforço.

Liu, Liu e Song (2017) indicam que o uso de micro estacas proporciona o controle das deformações durante a escavação, além de ser uma solução economicamente vantajosa. Contudo, informam que a pesquisa sobre a utilização de micro estacas em conjunto com solo grampeado ainda carece de maiores pesquisas, mesmo demonstrando sua efetividade na prática.

Yang (2012) informa que a avaliação dos deslocamentos de estruturas com solo grampeado composto ainda não é bem estabelecida por serem estruturas complexas. No estudo, o autor faz um levantamento estatístico de 26 casos de obras na China que utilizaram diferentes tipos de solo grampeado composto em escavações profundas. O resultado mostra que o deslocamento máximo lateral das estruturas variou entre 0,2%H e 0,4%H, sendo H a altura total da escavação. No que tange especificamente os deslocamentos máximos para estruturas de solo grampeado com micro estacas, os resultados de deslocamentos máximos variaram entre 13 mm e 22 mm.

Bishop, Jameson e DeBernardi (2009), mais ligados à indústria americana de execução de estruturas geotécnicas, relatam que a utilização de micro estacas em conjunto com solo grampeado é uma solução normalmente utilizada nas condições listadas a seguir:

- Locais com acesso limitado de equipamentos de grande porte;
- Suportar sobrecargas de estruturas existentes;
- Solo com baixa capacidade de carga que requer um aumento de rigidez na face da escavação;
- Aumento da rigidez da face de solo grampeado a fim de eliminar deslocamentos verticais.

Como pode ser visto, Bishop, Jameson e DeBernardi (2009) relatam que a solução pode trazer benefícios para a redução dos deslocamentos durante a escavação. Contudo, informam que, ainda na época do estudo, não havia ainda uma metodologia desenvolvida ou adaptada para projetar estruturas de solo grampeado em conjunto com micro estacas. Dessa forma, a aplicação vinha sendo utilizada por projetistas e executores utilizando sua experiência. E, ao que tudo indica, devido à falta de literatura técnica sobre o assunto ainda atualmente, essa realidade não se alterou significativamente, ficando ainda a critério de executores e projetista seu uso – similar à prática brasileira.

Apesar dos relatos nacionais e internacionais sobre a efetividade do uso de grampos verticais (ou micro estacas como chamado internacionalmente) em conjunto com solo grampeado, tais estruturas ainda carecem de maiores investigações numéricas e de campo. Contudo, analogias e hipóteses podem ser feitas. Para tanto, no presente documento a influência de grampos verticais em solo grampeado será dividida em quatro tópicos:

- 1) Injeção preliminar do solo;
- 2) Elemento estrutural;
- 3) Fundação;
- 4) Efeito de arco.

Vale ressaltar que esses tópicos não necessariamente são excludentes, ou seja, quando um ocorre outro não ocorrerá, pois o comportamento geomecânico do solo grampeado em conjunto

com grampos verticais possui uma complexidade substancial. A seguir serão discutidos cada um desses tópicos.

2.4.1 Injeção preliminar do solo

A injeção preliminar no maciço é uma técnica de tratamento de solo a qual injeta-se um determinado volume de calda de cimento a uma determinada pressão (Pitta, Zirlis e Souza, 2018). Essa é uma técnica muitas vezes utilizada para tratamento de fundações, estabilizações e melhora na capacidade de carga.

Conforme resumido por Pitta, Zirlis e Souza (2018), primeiramente se executa a perfuração do furo com trado. Posteriormente, executa-se a primeira fase de injeção denominada bainha, que é o preenchimento do furo com calda de cimento e introdução da barra de aço. A barra de aço, por sua vez, é colocada em conjunto com tubulações acessórias que por meio delas injeta-se a calda de cimento pressurizada. Por fim, a injeção é feita por fases setorizadas com pressões pré-determinadas. A técnica é ilustrada na Figura 19.

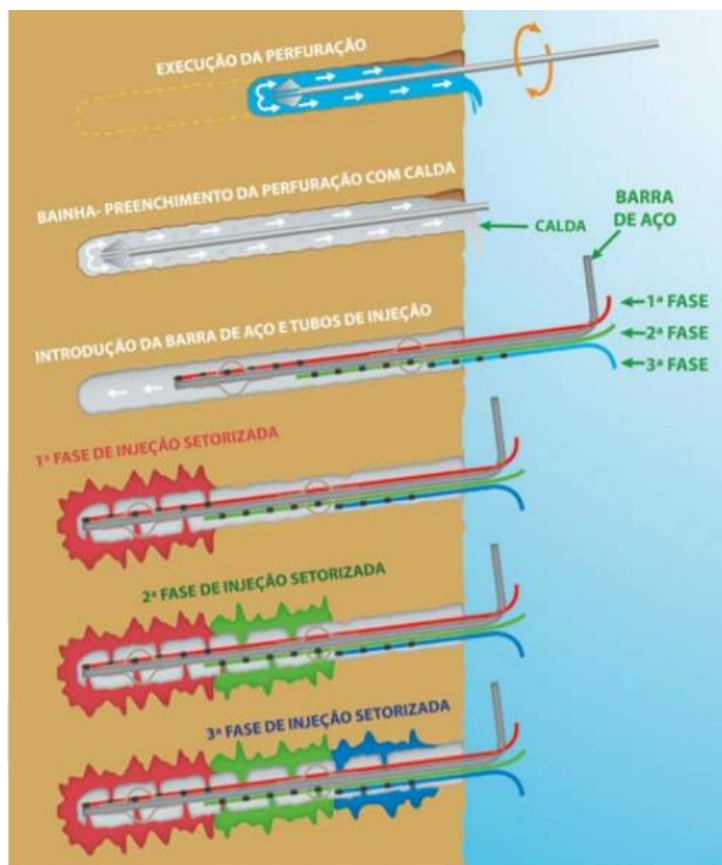


Figura 19 - Fases construtivas do chumbador pressurizado (Pitta, Zirlis e Souza, 2018)

O princípio da utilização em grampos verticais, nesse caso, é reforçar o solo antes do início das escavações, especialmente em solos mais deformáveis ou regiões onde possam ocorrer maiores deslocamentos, como as camadas superiores, por exemplo.

O grampo, sendo injetado, gera uma melhora no comportamento geomecânico do solo. Esse fenômeno foi relatado por Souza, Pitta e Zirlis (2005) em uma série de ensaios de campo em grampos sub-horizontais com 3 tipos de injeções: (I) injeção só com bainha; (II) injeção com bainha e primeira fase de injeção e (III) injeção com bainha e duas fases de injeção. Os autores realizaram ensaios de arrancamento e também escavaram as regiões onde foram executados os grampos a fim de observar o preenchimento gerado no solo pelas injeções. Segundo os ensaios de arrancamento, houve um aumento de 13% na carga de arrancamento utilizando uma fase de injeção e 57% utilizando duas fases de injeção em comparação com preenchimento somente com bainha. Tal resultado demonstra a efetividade das injeções. Quando os grampos foram parcialmente escavados observou-se, nos casos que foram utilizadas injeções, planos de clavagens diversas – vide Figura 20. Esses planos preenchem os vazios naturais do solo criando uma maior homogeneidade e melhorando seu comportamento geomecânico.



Figura 20 - Planos de clavagem no grampo executado com injeção (Souza, Pitta e Zirlis, 2005)

Pitta, Barbosa e Assis (2017) relatam que a execução de solo grampeado injetado mudou o cenário brasileiro de solo grampeado, possibilitando a execução de obras de maior porte. Isto se deve ao fato que a utilização de injeção tem como vantagens o reforço do solo adjacente aos chumbadores, o aumento da coesão local do maciço, a diminuição da permeabilidade global da

contenção e a homogeneização do solo sendo tratado. A Figura 21 demonstra a diferença entre grampos injetados e não injetados.



Figura 21 - Grampos não injetados acima e grampos injetados abaixo (Pitta, Barbosa e Assis, 2017)

2.4.2 Elemento estrutural

Outra analogia que pode ser feita com os grampos verticais é a técnica de ‘Estacas Raiz Reticuladas’ (E.R.R.), discutido por Lizzi (1982). Nesta, um grupo de estacas raiz é executado com inclinações variadas que servirão como reforço de solo e contenção, conforme a Figura 22 ilustra.

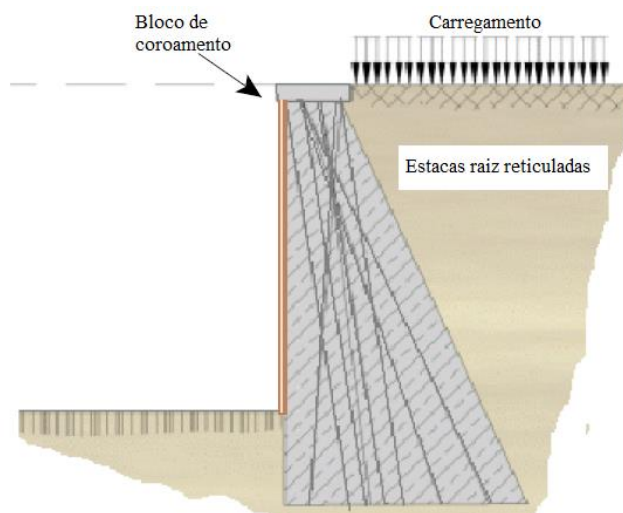


Figura 22 - Estacas raiz reticuladas (adaptado FHWA, 2005)

Lizzi (1982) relata que o principal mecanismo do sistema é a interação solo-estaca, porém, o mesmo é complexo e depende de muitas variáveis de difícil obtenção. Dessa forma, sua aplicação depende muito da experiência do projetista em obras similares e de levantamentos de campo. Do ponto de vista físico, o autor faz uma comparação com o reforço de estruturas de concreto com aço. Ou seja, no caso de E.R.R., o solo seria o concreto e o aço a estaca raiz. As estacas, neste caso, têm como princípio reforçar o solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento ou tração, caso houver. Pela localização próxima das estacas, surge também um efeito de grupo que auxiliará na contenção do maciço de solo. Por conta da significativa densificação resultante com a execução das estacas raiz, o sistema funciona como um grande muro de peso, resistindo aos esforços a montante.

Apesar do efeito de grupo mencionado pelos autores, em se tratando da contribuição do grampo vertical, isto talvez ocorra somente quando terminada a fase da instalação dos grampos horizontais e o sistema como um todo começar a interagir com o solo. Pois durante a fase de exposição do solo, o grampo vertical, estruturalmente, ao que tudo indica, se comportará individualmente como uma estaca à flexão visto que os esforços mais significativos são os empuxos laterais.

2.4.3 Elemento de fundação

Além dos esforços a flexão, devido à inclinação acentuada, nos grampos verticais são mobilizados também esforços de compressão (Pun, Cheung, e Shum, 2009), comportando-se como uma estaca. FHWA (2015) denomina os grampos verticais como *strut nails* e relata que estes, por resistirem a esforços de compressão, podem ser usados em casos onde a espessura do paramento de concreto é significativa e o seu peso é distribuído nos grampos verticais, como uma fundação. Além disso, podem ser usados em casos onde a capacidade de carga da fundação abaixo do paramento é de baixa resistência, servindo assim como um reforço de fundação. A utilização com esse intuito pode ser visto em Armour e Cotton (2003), Cotton e Luark (2010) e Stauffer *et al.* (2004).

2.4.4 Efeito de arqueamento

No meio geotécnico o efeito de arqueamento é um fenômeno conhecido em que devido à presença de elementos mais rígidos no solo ocorre uma redistribuição de tensões, acarretando na

concentração de tensões nas zonas mais rígidas e diminuição de tensões nas demais zonas (mais deformáveis), conforme ilustrado na Figura 23 no caso de uma contenção de perfil pranchado.

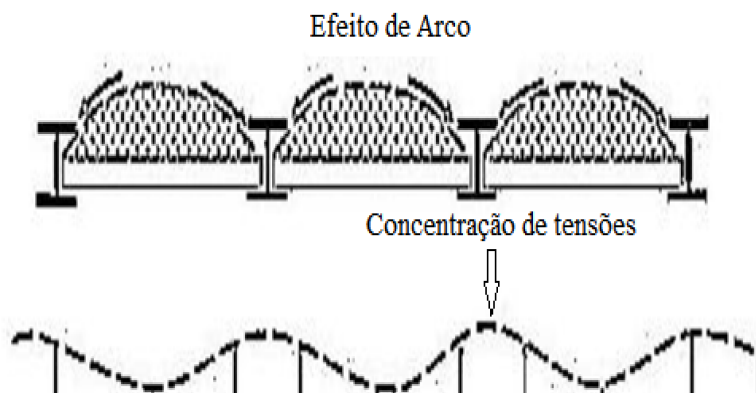


Figura 23 - Efeito de arco em contenção de perfil pranchado (adaptado Hosseinian e Seifabad, 2013)

Em estruturas de solo grampeado o efeito de arco ocorre na região do revestimento de concreto e entre os grampos. Nesse sentido, há uma concentração de tensões horizontais na cabeça dos grampos e diminuição de tensões entre os mesmos. FHWA (2015) relata que o efeito de arco em solos grampeados resulta em uma melhor redistribuição de tensões atuantes na cabeça dos grampos.

Bishop, Jameson e DeBernardi (2009) versam que o efeito da inserção de grampos verticais em uma estrutura de solo grampeado propiciará um efeito de arco no sistema solo-reforço, similar ao ilustrado na Figura 24 para grampos horizontais. Ainda, descrevem que sem a criação de uma superfície de aderência entre o grampo e as partículas de solo, cada um destes seria independente, não gerando o efeito de reforço desejado no solo.

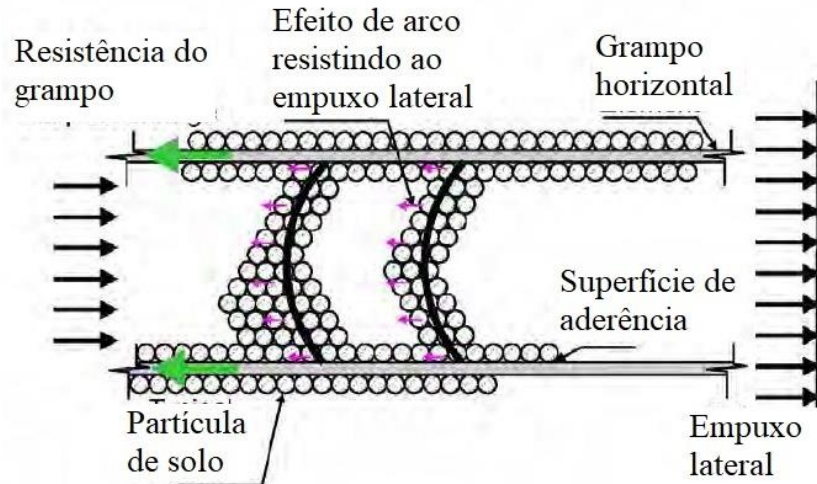


Figura 24 - Efeito de arco em solo grampeado (adaptado Bishop, Jameson e DeBernardi, 2009)

2.4.5 Parâmetros de projeto

Em termos de parâmetros de projeto, Pitta, Souza, & Zirlis (2013) recomendam que os grampos verticais sejam instalados no alinhamento do paramento entre os grampos horizontais com comprimento igual ao da altura do paramento somado 1,0 m. FHWA (2015) sugere a mesma configuração, porém, não cita o acréscimo de 1,0 m, somente informando que o grampo se estenda abaixo da base do paramento. Em relação aos diâmetros, em linhas gerais, adota-se os mesmos utilizados em grampos sub-horizontais.

2.4.6 Análises numéricas

Em relação às análises numéricas específicas para o estudo de grampos verticais em solo grampeado, quatro estudos brasileiros se destacam: Ferreira (2019); Souza (2019); e Mucheti, Albuquerque e Garcia (2019); e Gondim e Garcia (2018).

Ferreira (2019) analisou numericamente utilizando Método dos Elementos Finitos (MEF) um caso de obra de solo grampeado com grampos verticais. No estudo utilizou-se tanto modelos bidimensionais quanto tridimensionais através do programa PLAXIS. O autor relata que após análises de sensibilidade paramétricas, constatou-se que o Módulo de Young (E) e o Coeficiente de Empuxo no Repouso (K_0) são os dois parâmetros mais sensíveis na análise de deslocamentos de escavações. Ademais, em virtude dos pequenos deslocamentos nesse tipo de estrutura, sugere que seja utilizado o modelo constitutivo *Hardening Soil* como alternativa viável ao Mohr Coulomb, comumente utilizado na prática geotécnica. Ademais, o autor infere que a análise 2D

apresentou deslocamentos horizontais significativamente maiores do que a 3D. No que se refere à simulação dos elementos do solo grampeado, o autor utilizou o elemento de viga (*beam*) tanto para os grampos sub-horizontais quanto para os grampos verticais e o elemento de placa (*plate*) para o revestimento da face da escavação. Para os grampos verticais adotou-se 0,08 m de diâmetro. A Figura 25 representa o modelo utilizado pelo autor.

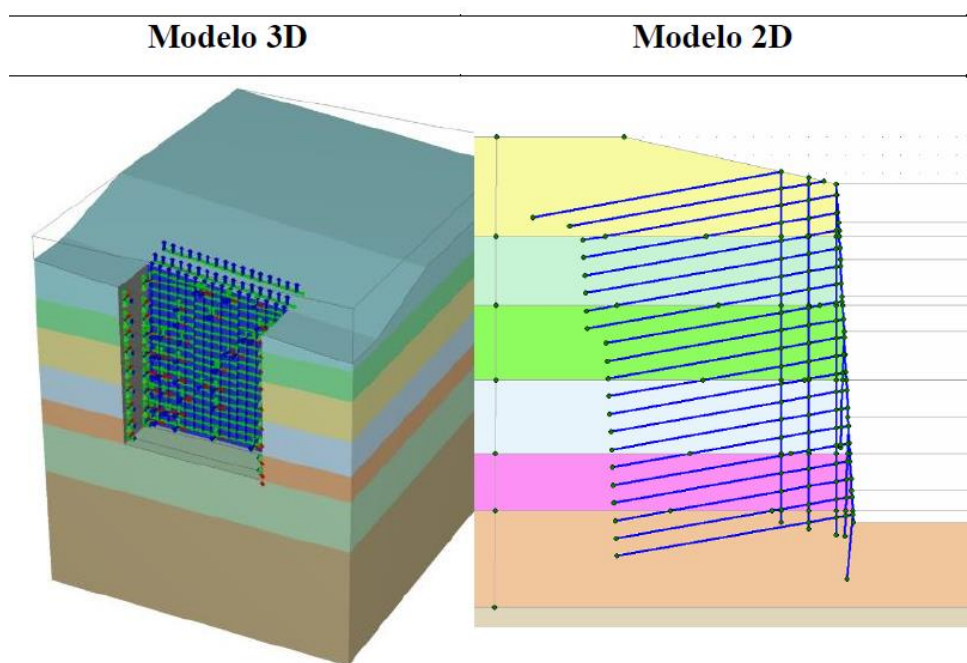


Figura 25 - Modelo 3D e 2D do solo grampeado de Ferreira (2019)

Para analisar a influência dos grampos verticais em relação aos deslocamentos horizontais da estrutura de solo grampeado, Ferreira (2019) simulou a estrutura com uma, duas e três fileiras de grampos verticais, e, por fim, sem grampo vertical. Com os resultados finais, observou que os grampos verticais reduziram os deslocamentos horizontais máximos em até 1%, com um média aproximada de 0,5% em relação aos deslocamentos máximos obtidos sem grampos horizontais. Como as reduções foram de ordem milimétrica, constatou que em termos estruturais os grampos verticais não influenciaram significativamente na diminuição dos deslocamentos horizontais, contudo, sua influência no aumento da rigidez local do solo, devido à injeção de calda de cimento, não deve ser desprezada.

Souza (2019) através de análises numéricas bidimensionais e tridimensionais com o programa de elementos finitos PLAXIS, buscou verificar a eficiência de grampos verticais

posicionados próximos à face da escavação de solo grampeado. A autora verificou a contribuição de grampos verticais na redução da tração gerada nos grampos sub-horizontais, redução nas deformações horizontais da face e o aumento do fator de segurança da estrutura. O modelo constitutivo para o solo foi o de Mohr-Coulomb e os grampos verticais e sub-horizontais foram modelados com o elemento *embedded beam*, que diferentemente do elemento de viga tradicional, considera uma região elástica, delimitada pelo diâmetro atribuído do grampo pelo usuário, em volta de um elemento de viga unifilar e, dessa forma, comportando-se praticamente como um elemento de volume. Para os grampos verticais adotou-se 0,10 m de diâmetro. Foram simulados modelos de escavações entre 6,0 e 9,0 m de altura com 2 a 4 fileiras de grampos verticais. A Figura 26 representa um dos modelos utilizados pela autora.

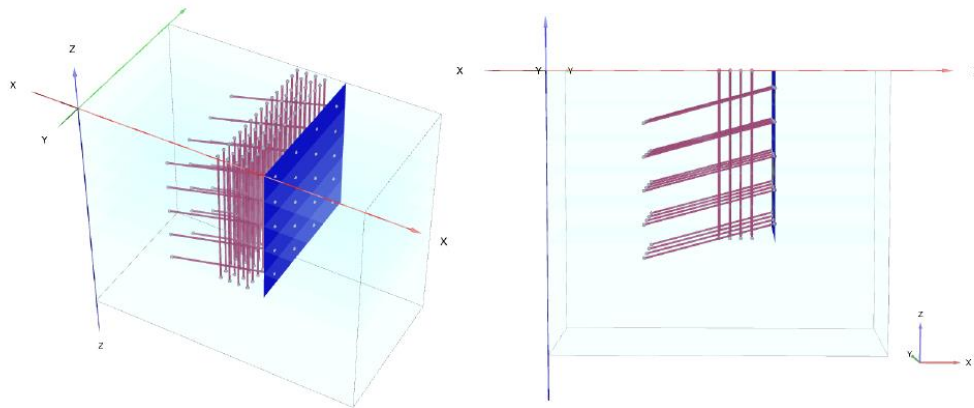


Figura 26 - Modelo com 4 grampos verticais de Souza (2019)

No que se refere ao aumento do fator de segurança, os resultados demonstraram uma efetividade baixa dos grampos verticais – ressalta-se que, nesse caso, a autora utilizou o programa Slide (Rocscience). A utilização dos grampos verticais resultou numa diminuição das trações máximas nos grampos sub-horizontais entre 20 e 25%. Quanto à diminuição dos deslocamentos horizontais na face da escavação, no modelo com 7,5 m de altura utilizando 4 fileiras de grampos verticais com espaçamento horizontal de 2 m entre eles houve uma redução de 26% aproximadamente. Já quando se reduz o espaçamento para 0,5 m entre os grampos verticais a redução é de 64%. Para o modelo com 9,0 m de altura e 4 fileiras de grampos verticais espaçados horizontalmente em 0,50 m, obteve-se uma redução de 65,5% na modelagem 3D e 45,6% na modelagem 2D. Cabe ressaltar que apesar das porcentagens altas de redução nos deslocamentos finais, estas se deveram ao fato da alta densidade de grampos verticais adotados (0,50 m de

espaçamento entre os grampos verticais), resultando em uma solução pouco usual em termos práticos. Por fim, a autora relata que dependendo do caso, buscando reduzir os deslocamentos máximos horizontais, é mais viável reduzir o espaçamento dos grampos sub-horizontais ou aumentar o diâmetro do grampo.

Mucheti, Albuquerque e Garcia (2019) simularam numericamente um caso de obra de solo grampeado com 8,35 m de altura que utilizou grampos verticais injetados. Os autores analisaram os deslocamentos finais e o fator de segurança quanto a estabilidade da estrutura. Para tanto, os autores realizaram análises tensão-deformação bidimensionais por elementos finitos e análises de estabilidade com diferentes métodos de equilíbrio limite por meio dos programas do pacote da empresa Geostudio. O grampo vertical foi modelado como estacas com 0,10 m de diâmetro e inclinação de 5° em relação ao paramento vertical de concreto projetado, sendo localizados no topo e pé da contenção. A capacidade de carga atribuída ao atrito lateral da estaca foi de 20 kN. A Figura 26 representa um dos modelos utilizados pelo autor.

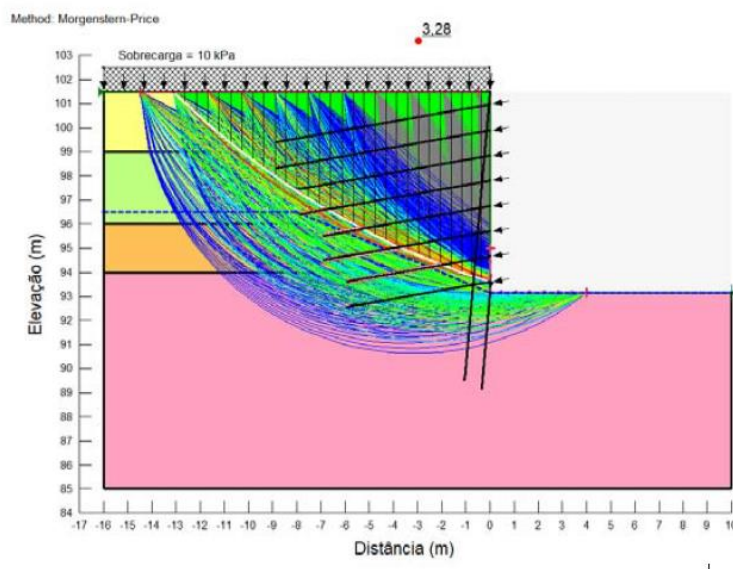


Figura 27 - Modelo de solo grampeado com grampo vertical utilizado por Mucheti, Albuquerque e Garcia (2019)

Segundo os resultados finais dos autores, com a configuração de grampo vertical adotado houve um ganho médio de 5% no fator de segurança relacionado à estabilidade. No que tange aos deslocamentos horizontais finais, houve uma redução de 20% para a metade superior do paramento e 10% para a metade inferior.

Gondim e Garcia (2018) elaboraram um estudo numérico bidimensional da estabilidade local e deformação de uma escavação de 5,0 m de altura estabilizada com solo grampeado considerando situações com reforço de grampo vertical. Nas situações utilizando grampo vertical consideraram grampo sem inclinação e com inclinação de 10° em relação ao paramento. Para análise dos deslocamentos os autores utilizaram o *software* RS2 (Rocscience). Os resultados obtidos para deslocamentos horizontais para a fase final de escavação estão apresentados na Figura 28. Sem a consideração do reforço com grampo vertical o máximo deslocamento horizontal foi de aproximadamente 15,6 mm. Para a situação com grampo vertical sem inclinação houve uma redução de 5,2 mm e com 10° de 2,0 mm, representando, respectivamente, uma redução em termos percentuais de 33% e 13%.

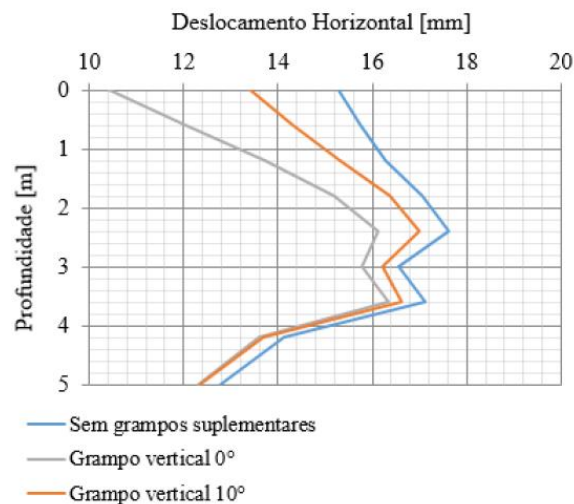


Figura 28 - Deslocamentos horizontais em escavações com e sem grampos verticais (Gondim e Garcia, 2018)

Como mencionado anteriormente, a China é um dos países que aparentemente mais se utiliza grampos verticais em conjunto com solo grampeado. Nesse sentido, quatro estudos numéricos se destacam: Jianhua, Guang e Erxaing (2012); Zhao *et al.* (2013); Zhao e Wang (2014); e Liu, Liu e Song (2017).

Jianhua, Guang e Erxaing (2012) desenvolveram um estudo numérico tridimensional através do *software* FLAC3D de uma escavação de 12,0 m reforçada com solo grampeado. O comprimento dos grampos sub-horizontais adotado foi entre 3,0 e 15,0 m espaçados com 1,50 m na horizontal e vertical. Além da estrutura convencional consideraram uma micro estaca com 8,0 cm de diâmetro instalada verticalmente atrás do paramento de concreto projetado também com

espaçamento de 1,50 m. Os grampos sub-horizontais foram modelados como elementos de cabo, sem resistência a flexão, já a micro estaca foi considerada como um elemento de viga, resistindo a flexão. Em relação ao modelo constitutivo de solo, os autores adotaram o modelo *Hardening Soil*. Segundo os resultados obtidos, a situação sem utilização de grampo vertical obteve um deslocamento máximo horizontal para a última fase de escavação de 33,2 mm. Considerando o grampo vertical obtiveram um deslocamento máximo de 28,2 mm, apresentando uma redução de 5,0 mm, representando 15,1% de redução. A Figura 29 demonstra o modelo adotado e os resultados obtidos.

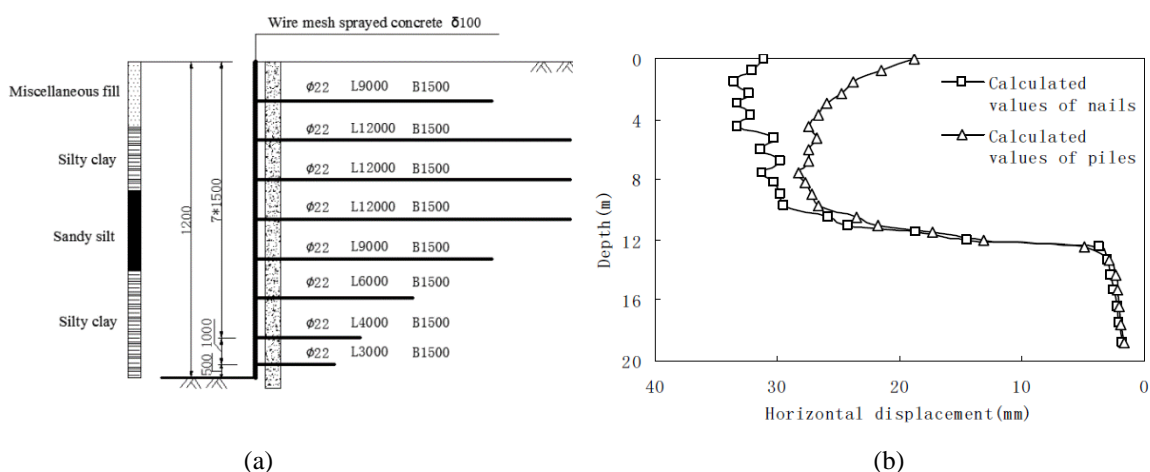


Figura 29 - Modelo de solo grampeado composto utilizado por Jianhua, Guang, e Erxaing (2012). a) Características da escavação; b) resultado obtidos com e sem a inclusão de grampos verticais

Zhao *et al.* (2013) avaliaram tridimensionalmente uma escavação com 12,5 m de altura através do *software* FLAC3D a qual foi previsto a utilização de micro estacas verticais assim como tirantes e grampos sub-horizontais. Os grampos sub-horizontais e tirantes foram simulados com elementos de cabo e o grampo vertical com elemento de viga. O espaçamento adotado entre os elementos foi de aproximadamente 1,50 m. Segundo os modelos, para a condição somente com solo grampeado o deslocamento máximo horizontal para a última fase de escavação foi de 61,2 mm. Considerando o reforço com tirantes obteve-se um deslocamento máximo de 45,7 mm. Para a situação com tirante em conjunto com micro estaca vertical o deslocamento máximo foi de 28,6 mm, representando uma redução de 17,1 mm. A Figura 30 demonstra as características do modelo adotado, bem como os resultados de deslocamentos horizontais para a última fase de escavação.

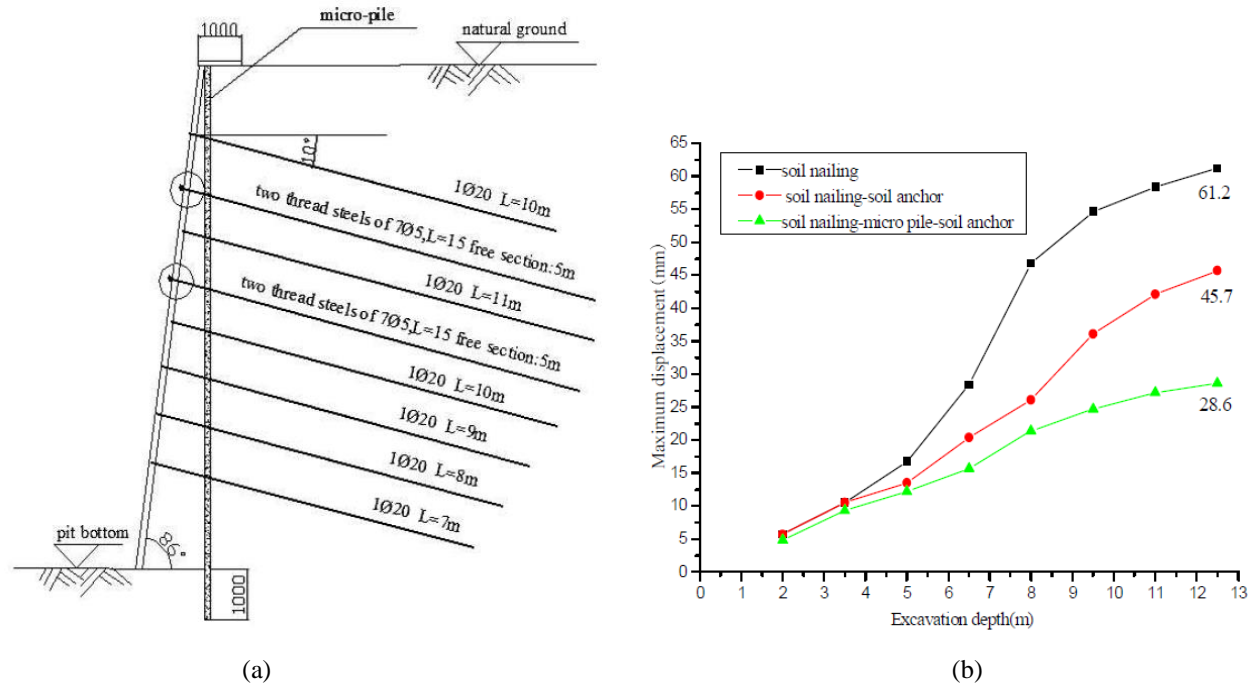


Figura 30 - Modelo de solo grampeado composto utilizado por Zhao *et al.* (2013). a) Características da escavação; b) resultado obtidos com e sem a inclusão de grampos verticais

Zhao e Wang (2014) realizaram um estudo numérico de tensão-deformação bidimensional com o *software* Z_Soil de uma escavação de 8,0 m de altura reforçada com solo grampeado e micro estaca. Os grampos sub-horizontais foram modelados como elementos de cabo, resistindo somente a tração. A micro estaca foi modelada como um solo com propriedades de deformabilidade e resistência maiores, sem inclinação em relação ao paramento de concreto. Os autores avaliaram a influência do diâmetro da micro estaca considerando diâmetros entre 0,40 e 2,40 m. Para a condição somente com solo grampeado o deslocamento horizontal máximo obtido foi de 30 mm aproximadamente. Através dos resultados com micro estaca observaram que, como era esperado, com o aumento do diâmetro maior a efetividade do reforço, obtendo-se uma redução máxima para o menor diâmetro (0,40 m) de 8,0 mm.

Liu, Liu e Song (2017) focaram seu estudo na avaliação do efeito de arco na utilização de micro estacas em conjunto com solo grampeado. Para tanto, desenvolveram um modelo numérico tridimensional no *software* FLAC3D de uma escavação de 7,0 m de profundidade reforçada com micro estacas de 12,0 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro – vide Figura 31. Os grampos sub-horizontais foram modelados como elemento de cabo e as micro estacas como elemento de volume com características de deformabilidade e resistência elevadas. Para avaliar o efeito de arco os

autores simularam diferentes cenários variando o espaçamento horizontal das micro estacas – e, conseqüentemente dos grampos sub-horizontais - entre 2D e 12D, sendo D o diâmetro da micro estaca. Em relação aos deslocamentos horizontais, observaram que quanto menor o espaçamento entre as micro estacas, menor os deslocamentos horizontais para a última fase de escavação. O modelo com espaçamento 2D se comportou como uma contenção de estacas a flexão, tendo pouca efetividade o uso dos grampos sub-horizontais. Aumentando-se o espaçamento, os grampos sub-horizontais tornaram-se mais efetivos, porém, os deslocamentos aumentaram. Em relação ao efeito de arco, avaliam que o mesmo ocorre com a consideração de micro estacas verticais, porém com o aumento de seu espaçamento o efeito decresce. Assim, sugerem um espaçamento entre 2D e 6D entre as micro estacas verticais para ocorrência do efeito e maior redução dos deslocamentos horizontais.

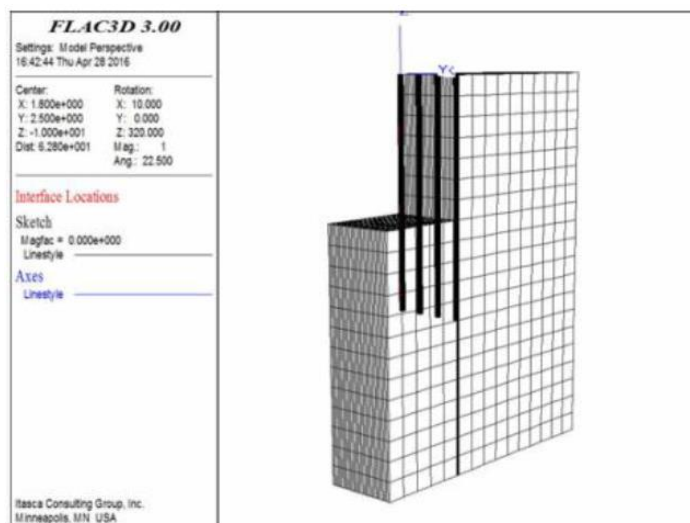


Figura 31 - Modelo tridimensional elaborado por Liu, Liu, e Song (2017)

2.5 Danos devidos às escavações

Tratando-se de escavações, principalmente em perímetros urbanos, a preocupação com os possíveis danos causados às estruturas vizinhas é algo relevante e que deve ser levado em consideração durante as análises desses projetos. Vale lembrar que o dimensionamento de uma escavação deve contemplar não somente as verificações dos critérios de ruptura, mas também os critérios de deslocamentos limites e suas deformações.

Nesse sentido, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989) propõem as seguintes definições de medidas para analisar os danos em uma estrutura (Figura 32 a Figura 35):

- 1) Recalque (S_v) é o deslocamento vertical de um ponto;
- 2) Recalque diferencial (δS_v) é o recalque vertical entre dois pontos;
- 3) Rotação (θ) é a mudança angular em relação a uma linha horizontal;
- 4) Distorção angular (β) é a relação entre o recalque diferencial e a distância entre dois pontos
- 5) Deflexão proporcional ($DR = \Delta/L$) é a relação entre a deflexão (Δ) e o comprimento correspondente (L);
- 6) Inclinação (ω) define a rotação de um corpo rígido;
- 7) Deformação horizontal (ϵ_h) é a relação entre o deslocamento horizontal entre dois pontos e sua respectiva distância.

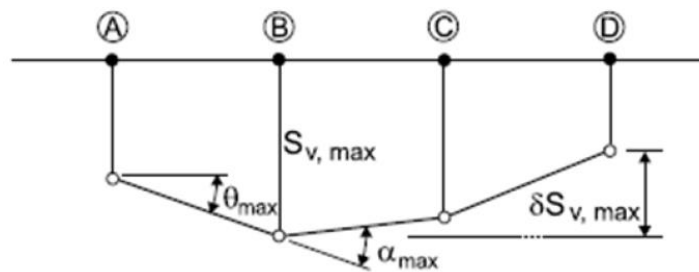


Figura 32 - Ilustração de recalque e rotação, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)

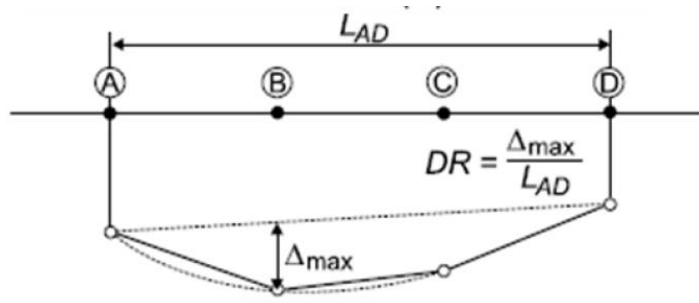


Figura 33 - Ilustração de deflexão proporcional, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)

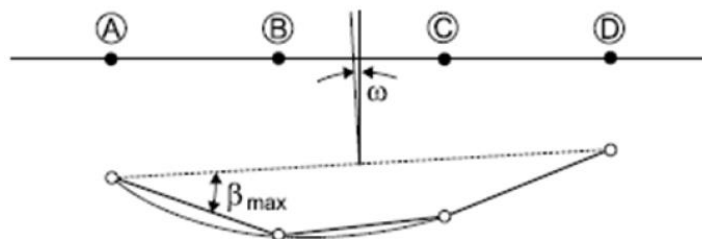


Figura 34 - Ilustração de inclinação e distorção angular, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)

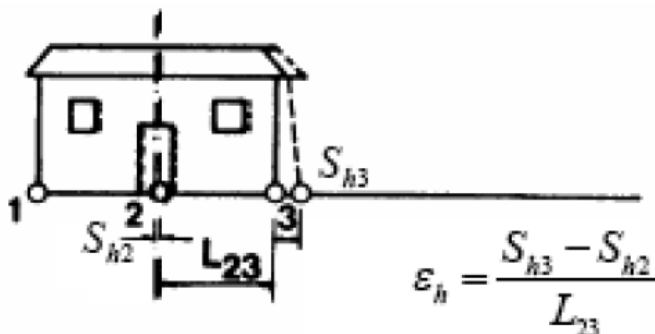


Figura 35 - Ilustração de deformação horizontal, Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989)

A partir das definições descritas anteriormente, o critério de análise tendo como filosofia o estado limite de serviço, em linhas gerais, é realizado através da análise de recalques ou deformações admissíveis nas estruturas. Essa análise é importante não somente durante a fase de projeto para prever qualitativamente e quantitativamente os danos possíveis em estruturas lindeiras à escavação, mas também durante a fase de obra a fim de retro-analisar as premissas adotadas na fase de projeto e adotar possíveis medidas mitigadoras.

Os valores de referência de deformações e recalques admissíveis encontrados na literatura são baseados em levantamentos empíricos realizados por diversos autores incluindo Meyerhof (1947), Skempton e Macdonald (1956), Polshin e Tokar (1957), Burland e Wroth (1974) e Boscardin e Cording (1989). Apesar desses levantamentos, essas são indicações e não devem ser tratados como limites únicos, visto que esse é um problema complexo (Milititsky, Consoli e Schnaid, 2015).

Poulos, Carter e Small (2001), através do levantamento de dados de diferentes fontes resumem alguns valores limites de deformações e recalques de acordo com o tipo de estrutura e dano, resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores limites de deformações e recalques (Poulos, Carter e Small, 2001)

Tipo de estrutura	Tipo de dano	Critério	Valor limite
Edifícios aporricados em concreto armado e paredes estruturais reforçadas	Dano estrutural	Distorção angular	1/150 a 1/250
	Fissuras em paredes	Distorção angular	1/500 1/1.000 a 1/4.000 para vãos extremos
	Aspecto visual	Inclinação	1/300
	Conexão com serviços	Deslocamento total	50 a 75 mm em areia 50 a 135 mm em argila
Edifícios altos	Operação de elevadores	Inclinação	1/1.200 a 1/2.000
Paredes estruturais sem estrutura de concreto armado	Fissuras por arqueamento côncavo relativo	Taxa de deflexão	1/2.500 para paredes com relação comprimento/altura = 1 1/1.250 para paredes com relação comprimento/altura = 5
		Taxa de deflexão	1/5.000 para paredes com relação comprimento/altura = 1 1/1.2500 para paredes com relação comprimento/altura = 5
Pontes	Qualidade de tráfego	Deslocamento total	100 mm
	Função	Movimento horizontal	38 mm
	Dano estrutural	Distorção angular	1/250 para vários vãos 1/200 para vão único

A Tabela 4 apresenta o levantamento realizado por Milititsky (2016) sobre recomendações de diferentes autores de recalques máximos de fundações isoladas e radiers em areias e argilas.

Tabela 4 - Recomendações de recalques máximos indicadas por diferentes autores (Milititsky, 2016)

Tipo de fundação	Solo	Recalque total (cm)	Recalque diferencial (cm)	Referência
Sapatas isoladas	Areia	2,50	2,00	Terzaghi e Peck (1967)
		5,00	3,00	Skempton e McDonald (1957)
		3,00	-	JSA (1988)
	Argila	7,50	-	Skempton e McDonald (1957)
		10,00	-	JSA (1988), AIROC (1989)
Radier	Areia	5,00	2,30	Terzaghi e Peck (1967)
		5,0 a 7,5	3,00	Skempton e McDonald (1957)

Tipo de fundação	Solo	Recalque total (cm)	Recalque diferencial (cm)	Referência
		6,0 a 8,0	-	JSA (1988)
		-	3,00	Grant, Christian e Vanmarcke (1974)
		7,5 a 12,5	4,50	Skempton e Mcdonald (1957)
	Argila	20,0 a 30,0	-	JSA (1988), AIROC (1989)
		-	5,60	Grant, Christian e Vanmarcke (1974)

Bjerrum (1963) *apud* Albuquerque & Garcia (2020) estabelece determinados danos relacionados aos limites de distorção angular resumidos na Figura 36.

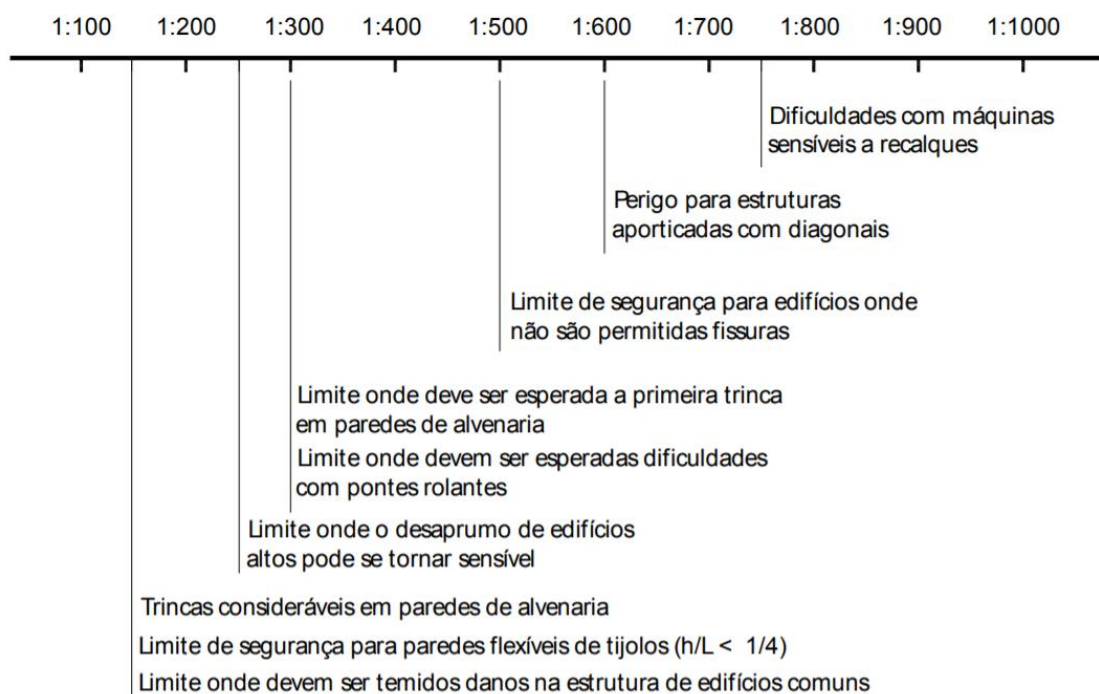


Figura 36 - Distorção angular relacionada ao possível dano, Bjerrum (1963) *apud* Albuquerque & Garcia (2020)

Boscardin e Cording (1989) sugerem os critérios de danos através da relação entre distorção angular e deformação horizontal conforme a Figura 37.

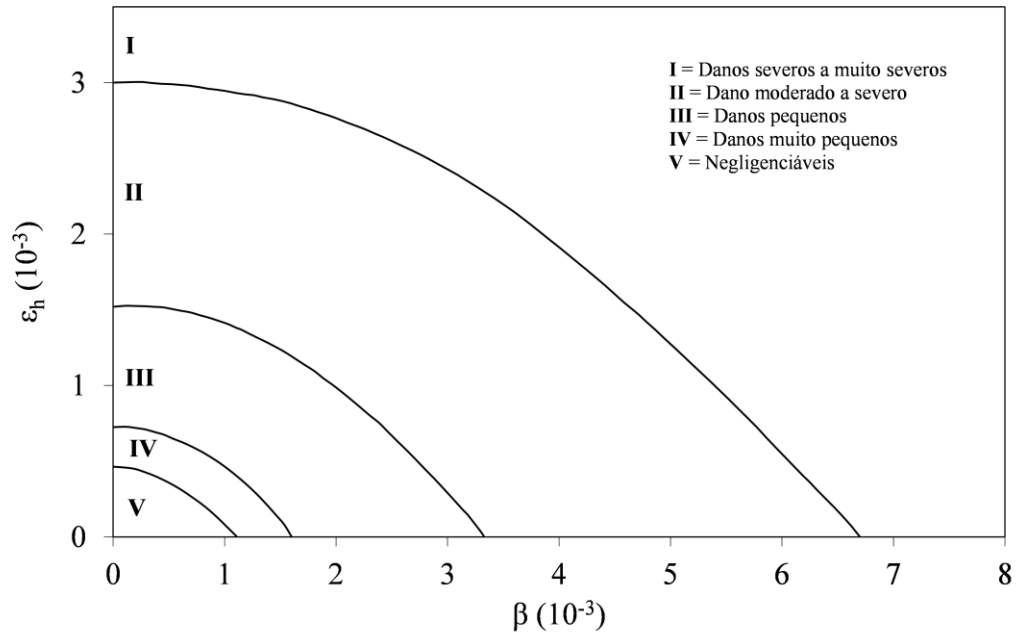


Figura 37 - Critérios de danos, adaptado Boscardin e Cording (1989)

Especificamente para solos grampeados, FHWA (2015) sugere os limites de deformação relacionado à altura da escavação resumidos na Tabela 5. Nesta, apresenta-se uma relação percentual dos deslocamentos horizontais (δ_h) em solo grampeado com a altura (H) do paramento, segundo o tipo de solo.

Tabela 5 - Limites de deslocamentos horizontais de solo grampeado segundo FHWA (2015)

δ_h / H (%)		
Solos finos	Solos granulares	Rochas alteradas
0,3% H	0,2% H	0,1% H

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de avaliar a influência dos grampos verticais em solo grampeado foram realizadas análises bidimensionais e tridimensionais de tensão-deformação com elementos finitos utilizando os *softwares* RS2 e RS3, que fazem parte do pacote da empresa Rocscience (Rocscience, 2019a; Rocscience, 2019b). Neste capítulo serão apresentados os dados e premissas adotados.

3.1 Modelo sem grampo vertical

Primeiramente, como referência para as análises foi validado o modelo de solo grampeado nos *softwares* supracitados sem a utilização de grampo vertical. Para este caso, utilizou-se o modelo hipotético de escavação grampeada adotado por Gerscovich *et al.* (2005) com as mesmas característica geotécnicas descritas nos tópicos a seguir.

3.1.1 Modelo constitutivo e parâmetros de solo

O modelo constitutivo adotado por Gerscovich *et al.* (2005) para representação do solo foi o elástico perfeitamente plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Em relação ao comportamento tensão-deformação, o solo foi considerado como um meio contínuo, homogêneo e isotrópico. Os parâmetros geomecânicos do modelo encontram-se na Tabela 6 a seguir. Vale ressaltar que os parâmetros de solo e geometria da escavação adotados por Gerscovich *et al.* (2005) foi baseado no estudo de Lima (2002).

Tabela 6 - Parâmetro geotécnicos adotados por Gerscovich *et al.* (2005)

Grampo				Parede		Solo						
$\sigma_{aço}$	$E_{aço}$	$G_{injeção}$	q_s	E_{parede}	h_{parede}	E_{solo}	ν	γ	c	ϕ	ψ	k_0
MPa	GPa	GPa	kPa	GPa	cm	Mpa		kN/m ³	kPa	graus	graus	
500,0	205,0	9,0	150,0	24,0	10,0	45,0	0,3	18,5	10,0	32,0	7,5	0,5

Onde:

$\sigma_{aço}$ = tensão de escoamento do aço;
 $E_{aço}$ = Módulo de Young do aço;
 $G_{injeção}$ = módulo cisalhante da nata de cimento;
 q_s = resistência ao arrancamento do grampo;
 ν = coeficiente de Poisson;

γ = peso específico natural do solo;
 c = coesão efetiva do solo;
 ϕ = ângulo de atrito do solo;
 ψ = ângulo de dilatação do solo;
 k_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

3.1.2 Geometria, condições de contorno e discretização da malha

Em relação à geometria do modelo, adotaram os limites de fronteira de 52,50 m na horizontal e 21,00 m na vertical, conforme a Figura 38 ilustra.

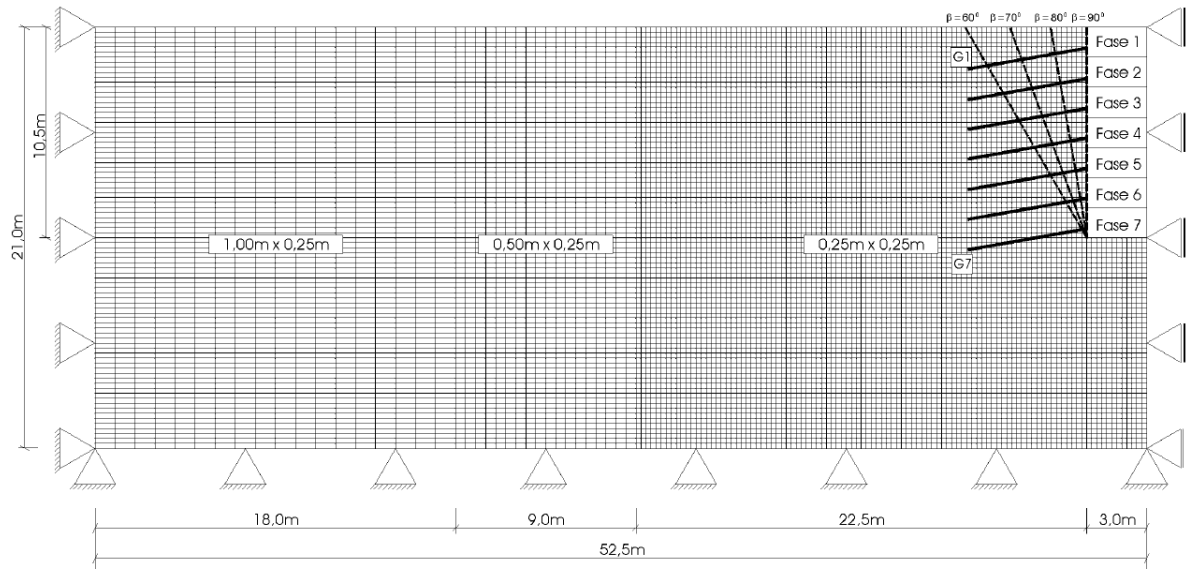


Figura 38 - Geometria do modelo adotado por Lima (2002) e Gerscovich *et al.* (2005)

Nas Figuras 39, 40 e 41 encontram-se os modelos 2D e 3D do presente estudo, os quais seguiram a geometria do modelo original.

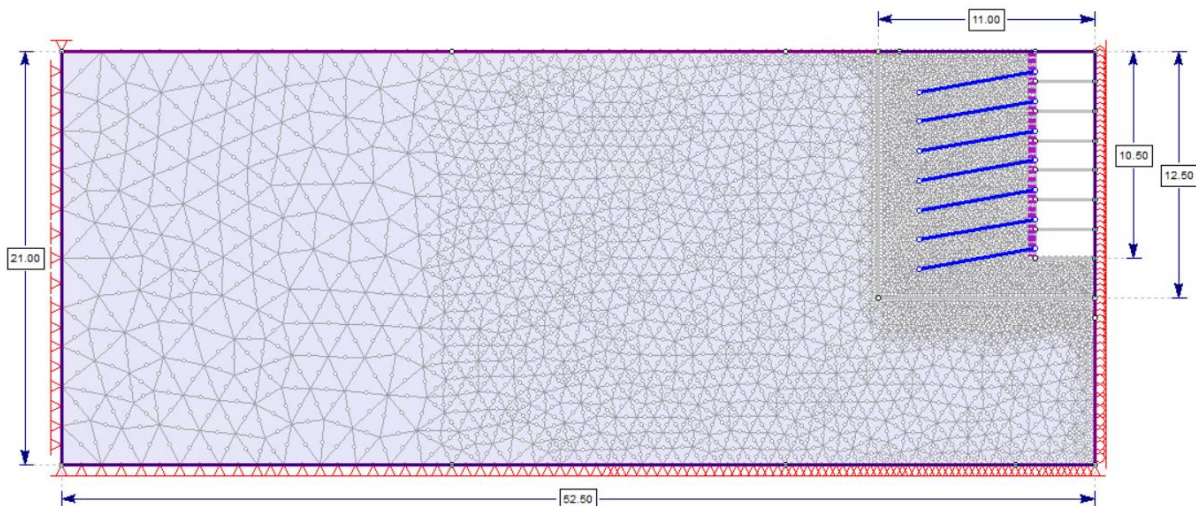


Figura 39 - Modelo 2D elaborado no *software* RS2

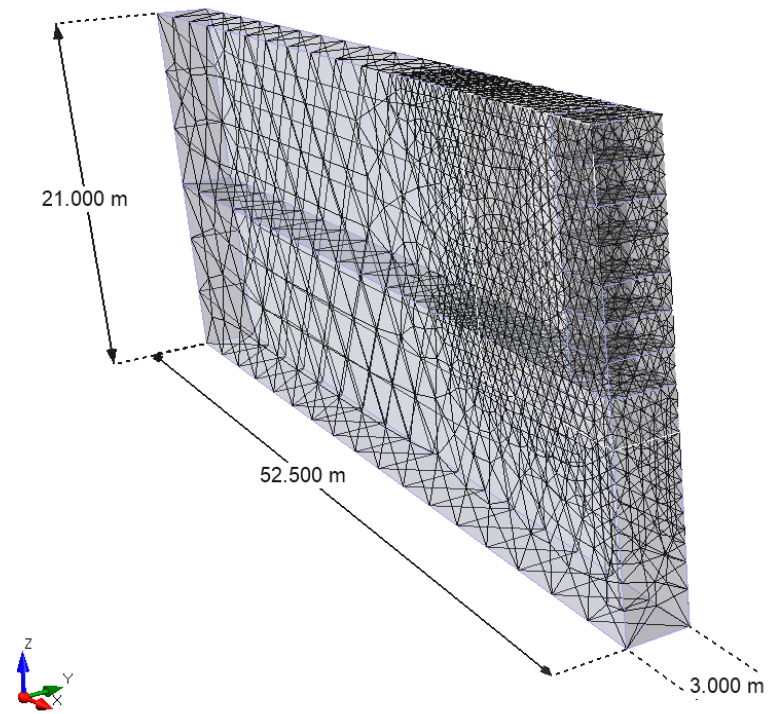


Figura 40 - Visão paramétrica do modelo 3D elaborado no software RS3

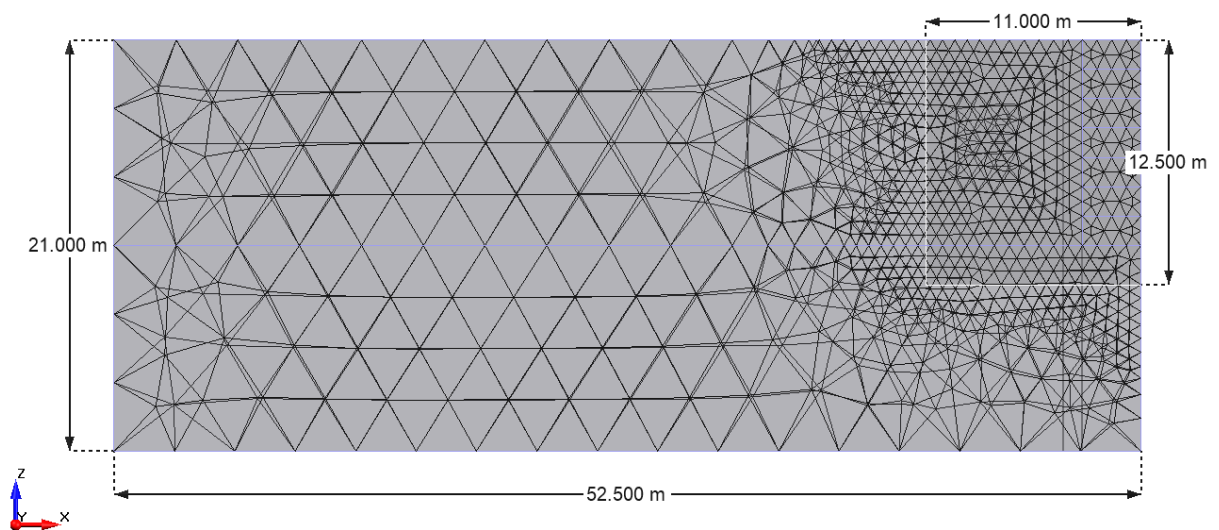


Figura 41 - Visão do plano ZX do modelo elaborado no software RS3

Antes da descrição das condições de contorno adotadas para os modelos, é importante ressaltar que no RS2 a direção horizontal é adotada como X e a vertical como Y. Já no RS3 a direção vertical é adotada como Z, a horizontal é X e a profundidade é Y.

Nesse sentido, para o modelo 2D, conforme pode ser visto na Figura 39, adotou-se a restrição de deslocamento na base tanto em X quanto em Y. Na fronteira direita adotou-se

restrição somente em X e para a fronteira esquerda restringiu-se os deslocamentos em X e Y. Na fronteira superior não foi imposto nenhum tipo de restrição de deslocamento.

O modelo 3D seguiu os mesmos princípios, porém com a consideração de mais uma direção para as restrições de deslocamento, ou seja, na base (plano XY) restringiu-se os deslocamentos em X, Y e Z; na fronteira direita (plano ZY) restringiu-se os deslocamentos em X e Y; na fronteira esquerda (plano ZY) restringiu-se os deslocamentos em X, Y e Z; no topo não foi imposto nenhum tipo de restrição; e nas duas faces restantes (plano ZX) adotou-se restrição somente em Y, conforme pode ser visto na Figura 42.

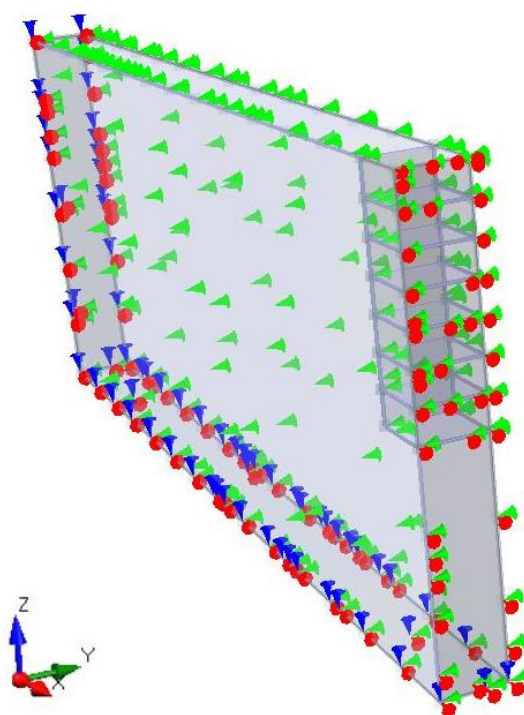


Figura 42 - Condições de contorno para o modelo 3D

Em relação às propriedades das malhas de elementos finitos adotadas, para o modelo 2D utilizou-se elementos triangulares de 6 nós e com o intuito de refinar o modelo nas regiões mais importantes no que concerne aos resultados de tensões e deslocamentos, adotou-se uma discretização maior próximo à escavação com dimensões de 11,00 x 12,50 m, conforme pode ser verificado na Figura 39. Nesse sentido, enquanto o tamanho médio dos lados dos elementos triangulares fora da região refinada é de 1,0 m, na região refinada é de 0,20 m, ou seja, 5 vezes mais discretizada.

Já para o modelo 3D utilizou-se elementos tetraedros de 10 nós e também foi criada uma região refinada próxima à escavação com as mesmas dimensões do modelo 2D, conforme pode ser observado na Figura 41. Assim, enquanto o tamanho médio dos lados dos elementos

tetraedros fora da região próxima da escavação possuem 3,0 m de largura, na região próxima da escavação a largura é de 0,50 m, ou seja, 6 vezes mais discretizada. Vale ressaltar que mesmo com um fator de discretização entre a região sem refinamento e com refinamento maior para o modelo 3D, nota-se que o tamanho médio dos elementos é maior em relação ao modelo 2D. Isso se deve ao fato que quanto maior a discretização dos modelos maior o tempo de processamento computacional, principalmente para modelagem tridimensional. Além disso, essa diferença de discretização entre o modelo 2D e 3D não resultou em diferenças significativas nos resultados que serão apresentados no tópico de análise dos resultados.

É válido ressaltar que em todos os modelos elaborados nessa pesquisa, antes de realizar os cálculos, as malhas foram verificadas através da ferramenta *Mesh Quality*, a qual analisa a qualidade da malha de elementos finitos a fim de ressaltar possíveis incoerências de geometria e discretização. No caso, todos os modelos apresentaram uma qualidade de malha de 100%.

3.1.3 Etapas de escavação

A escavação tem uma profundidade total de 10,5 m e, conforme adotado por Gerscovich *et al.* (2005), foi dividida em 7 etapas de 1,50 m de altura cada. Para cada uma destas etapas foi simulada a escavação em conjunto com a aplicação do grampo sub-horizontal e a face de concreto projetado. As tensões geostáticas iniciais no maciço de solo foram geradas antes do início da simulação das etapas de escavação. Portanto, no total, tanto o modelo bidimensional quanto o tridimensional possuem 8 etapas de simulação, sendo a primeira com a geração das tensões iniciais e as demais simulando a escavação.

3.1.4 Tipo de elemento para o grampo sub-horizontal e face

Os grampos sub-horizontais possuem 6 m de comprimento no total com espaçamento vertical e horizontal de 1,50 m, e com inclinação de 10° com a horizontal. Eles ainda são compostos por uma barra de aço de 25 mm de diâmetro e os furos para a injeção da calda de cimento possuem 75 mm. A face de concreto projetado possui 10 cm de espessura.

Gerscovich *et al.* (2005) para a simulação do concreto projetado adotaram elemento de viga. Seguindo a mesma premissa dos autores, no presente estudo utilizou-se o elemento *liner*, disponível no RS2 e RS3, sendo este um elemento de viga que, conseqüentemente, resiste à esforços normais, de flexão e cisalhamento.

Gerscovich *et al.* (2005), utilizando os programas PLAXIS e FLAC, elaboraram simulações numéricas tanto com elementos para simulação dos grampos sub-horizontais que não resistem à flexão (elementos de cabo) quanto com elementos que resistem à flexão

(elementos de viga), considerando ou não elementos de interface. Estes constataram através de comparações que a consideração da resistência à flexão tem pouca influência para níveis de deformação inferiores à condição de ruptura. Além disso, também constataram que a consideração dos elementos de interface resultou em uma influência pouco significativa nos resultados dos modelos.

Nesse sentido, na presente pesquisa optou-se por utilizar o elemento *Fully Bonded* para a simulação dos grampos sub-horizontais, tanto para o modelo bidimensional quanto para o tridimensional. O *Fully Bonded* é uma das diferentes opções de suporte no RS2 e RS3. Esse elemento é dividido em elementos lineares, de acordo com o local onde cruzam a malha de elementos finitos, que não resistem à flexão. O modelo não considera a interação solo-grampo - ou seja, os grampos foram considerados perfeitamente ancorados no maciço de solo. A Figura 43 ilustra o modelo previamente descrito (Rocscience, 2019a, 2019b).

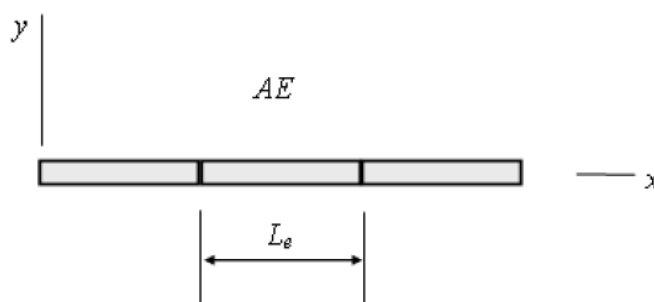


Figura 43 - Modelo de *Fully Bonded* no RS2 e RS3 (Rocscience, 2019a, 2019b)

A força axial (F_e) ao longo do suporte é determinada pela sua deformação, conforme a Lei de Hooke. Assim, se a largura do elemento linear é L_e , e é aumentada por Δ_{ue} , então F_e é determinado pela equação (5) (Rocscience, 2019a, 2019b):

$$F_e = \frac{EA\Delta_{ue}}{L_e} \quad (5)$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade do elemento (kPa)

A = Área da seção transversal do elemento (m²)

O critério de ruptura do *Fully Bonded* é determinado quando a resistência máxima do modelo é alcançada (F_{yield}), sendo então adotado sua resistência residual (F_{res}), conforme ilustra a Figura 44 (Rocscience, 2019a, 2019b).

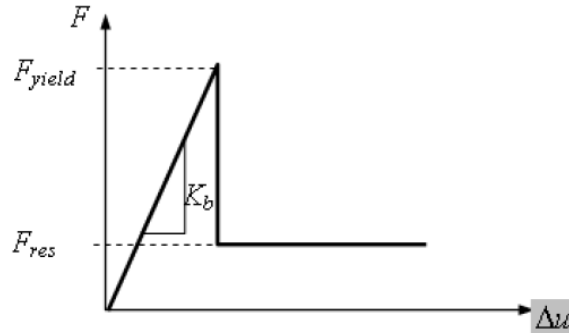


Figura 44 - Critério de ruptura do elemento Fully Bonded no RS2 e RS3 (Rocscience, 2019a, 2019b)

Os principais parâmetros para os elementos *Fully Bonded* são:

- Diâmetro do grampo (m). Neste caso, utilizou-se o valor de 0,075 m;
- Módulo de elasticidade do grampo (kPa). Para sua obtenção, optou-se por utilizar as recomendações de Singh e Babu (2010) que utilizam um módulo de elasticidade equivalente (E_{eq}), considerando o aço e a injeção da calda de cimento, através da equação (6):

$$E_{eq} = E_n \left(\frac{A_n}{A} \right) + E_g \left(\frac{A_g}{A} \right) \quad (6)$$

onde A é a área da seção transversal da perfuração, com valor de $4,42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; A_n é a área da seção transversal da barra de aço, com valor de $4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; $A_g = A - A_n$ é a área resultante da calda de cimento, com valor de $3,93 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; E_n é o módulo de elasticidade do aço, com valor de 205 GPa; E_g é o módulo de elasticidade da calda de cimento, com valor de 21,6 GPa. O valor resultante de E_{eq} é de 41.978 MPa;

- Resistência a tração do grampo (F_t), com valor de 150 kN. Para sua obtenção utilizou-se a equação (7) a seguir:

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (7)$$

$$F_t = \sigma_{adm} \times A' = \frac{500}{1,15} \times (25 - 4)^2 \times \frac{\pi}{4} = 150kN$$

onde σ_{adm} é a tensão admissível do aço expressa em MPa; f_{yk} é o valor característico de resistência ao escoamento do aço em MPa; A' é a área da seção transversal do aço considerando uma corrosão total de 4 mm.

- Resistência residual a tração do grampo, com valor de 150 kN. Este valor é adotado pelos programas quando o limite a tração do grampo é alcançado durante a modelagem;
- Espaçamento horizontal dos grampos de 1,50 m. Esse parâmetro somente é utilizado no RS2 para simular a condição tridimensional dos grampos, sendo, então, dividida a área da seção transversal do grampo, neste caso, por 1,50.

3.1.5 Análise dos resultados

Em posse do modelo bidimensional e tridimensional, a validação foi realizada através de comparações dos deslocamentos horizontais e esforços axiais nos grampos sub-horizontais na última fase de escavação com os modelos elaborados por Gerscovich *et al.* (2005).

Vale ressaltar que os deslocamentos horizontais foram plotados a 1,0 m de distância da face da escavação.

3.2 Modelo com grampo vertical

Após a validação do modelo sem grampo vertical, elaborou-se modelos com grampo vertical com o intuito de avaliar sua influência na estrutura de solo grampeado. Para tanto, realizaram-se somente análises tridimensionais no RS3 utilizando-se o mesmo modelo tridimensional descrito anteriormente, porém com a consideração do grampo vertical. Isso foi adotado pois, em virtude da posição relativa entre o grampo vertical e sub-horizantal, esse é um problema essencialmente 3D. Vale ressaltar que possivelmente é viável a consideração de grampos verticais em modelos bidimensionais através de ponderações dimensionais, porém, esse não é o objetivo da presente pesquisa. A seguir se encontra os dados e premissas adotados.

3.2.1 Modelo com parâmetros de Gerscovich *et al.* (2005)

Primeiramente, foi elaborado um modelo com grampo vertical utilizando os mesmos parâmetros de solo resumidos na Tabela 6, porém considerando grampo vertical. Nesse caso, utilizou-se uma linha de grampos verticais sem inclinação, com 15 cm de diâmetro, 12,50 m de comprimento e espaçados entre os grampos sub-horizontais, ou seja, a cada 1,50 m. A Figura

46 ilustra o modelo e o capítulo 3.2.4 apresenta as considerações sobre o tipo de elemento e seus critérios para a representação do grampo vertical.

3.2.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros de solo

Além do modelo elaborado com grampo vertical adotando os parâmetros de solo resumidos na Tabela 6, optou-se também por avaliar a influência do grampo vertical utilizando outros parâmetros de solo. Tal adoção leva em conta a questão que possivelmente os grampos verticais, por possuírem majoritariamente diâmetros e rigidez baixas, não terão um efeito tão significativo em solos pouco deformáveis, como é o caso do solo da Tabela 6. Isso será mais detalhado no tópico de resultados.

Isto posto, como referência de parâmetros para a análise, utilizou-se alguns solos típicos da cidade de São Paulo. Como resumido por Grandis e Marzionna (2012), as camadas de solo que constituem a Bacia Sedimentar de São Paulo estão dispostas segundo a Tabela 7.

Tabela 7 - Disposição dos solos da Bacia Sedimentar de São Paulo (Grandis e Marzionna, 2012)

Cota	Tipo de solo
825 a 750	Camadas superficiais de Argilas porosas vermelhas
800 a 750	Argilas rijas e duras vermelhas, amarelas e cinzas
750 e 720	Camadas intermediárias de argilas rijas e areias finas e médias argilosas variegadas
Camadas profundas abaixo de 725	Areias compactas vermelhas e cinzas e argilas duras, de cor cinza e esverdeadas
Abaixo de 725	Areias basais, pouco argilosas
Entre as cotas anteriores, predominantemente entre 800 e 705	Lentes de concreções de limonita
Afloramentos	Solos residuais

Ademais, os mesmos autores através de levantamento de diferentes fontes, indicam alguns valores de parâmetros de solos para projetos de contenções na cidade de São Paulo, resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de interesse das principais camadas de solo da região de São Paulo (Grandis e Marziona, 2012)

	Argilas porosas moles vermelha	Argilas porosa médias vermelha	Argilas duras cinza-esverdeadas	Areias basais	Argilas e siltes variegados	Argilas duras vermelhas e amarelas	Solos residuais de granito-gnaise
LL (%)	70-96	73-92	50-90		50-75	55-95	40-50
LP (%)	27-53	32-48	30-60		14-45	30-50	15-25
σ_p (kPa)	50-140	110-420	700-850		120-500	500-1000	
Cc/(1+e0)	0,17-0,23	0,18-0,23	0,11-0,21		0,10-0,22	0,16-0,28	
γ_{nat}	13-15	15-17	19-20	19-20	17-20	17-19	
c' (kPa)	0-40	20-60	40-70		10-80	50-90	30-110
ϕ (°)	26-33	27-31	21-30	32-35	20-32	21-30	23-26
E (Mpa)	3-17	5-20		1000. σ_v '	10-180	400 a 1000 σ_v '	
Nspt	2-7	4-10	>20				

Nota: LL = limite de liquidez; LP = Limite de plasticidade; σ_p = tensão de pré-adensamento; Cc = índice de compressão; e0 = índice de vazios inicial; γ_{nat} = peso específico natural; c' = coesão efetiva; ϕ = ângulo de atrito efetivo; E = módulo de deformabilidade do solo; Nspt = índice de resistência à penetração

A partir dessas indicações, optou-se por realizar uma análise sensibilidade do solo dividindo o maciço em duas camadas principais: i) camada de argila porosa vermelha mole a média até 10,5 m de profundidade; ii) camada de argila rija variegada até 21,0 m de profundidade, limite do modelo numérico.

Vale lembrar que análises de sensibilidade de parâmetros de solo tem como objetivo avaliar quantitativamente o impacto de cada parâmetro em um determinado comportamento do modelo, nesse caso, os deslocamentos horizontais. Para tanto, adota-se uma variação porcentual de um certo parâmetro enquanto que os demais são mantidos. Na presente pesquisa desenvolveu-se a análise de sensibilidade somente na primeira camada de solo visto que essa terá uma maior influência no comportamento do solo grampeado.

Em relação aos parâmetros, adotou-se variações no módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito. A faixa de valores e variações porcentuais estão resumidas nas tabelas 9 e 10.

Como o intuito dessa análise é verificar a influência do grampo vertical na redução de deslocamentos horizontais em diferentes tipos de solo, desenvolveu-se modelos com e sem grampo vertical com os diferentes tipos de parâmetros de solo. Ademais, adotou-se também uma sobrecarga de 10 kPa no terrapleno em todos os modelos, simulando, assim, alguma estrutura lindeira à escavação, comum em ambientes urbanos.

As especificações e critérios dos grampos verticais serão melhor detalhados nos próximos tópicos, porém, para essas análises adotou-se uma fileira de grampos verticais de 15 cm de diâmetro sem inclinação, com 12,50 m de comprimento localizados entre os grampos sub-horizontais.

Tabela 9 - Parâmetros de solo adotados para a análise de sensibilidade do solo

Solo	H (m)	E MPa	v	γ kN/m³	c kPa	ϕ graus	K₀*
Argila Porosa Vermelha mole a média	10,5	8 a 25	0,30	15,0	10 a 30	24 a 36	0,59 a 0,41
Argila Rija variegada	21,0	25,0	0,25	18,0	50,0	28,0	0,53

*baseado em Jaky (1944)

Tabela 10 - Variação percentual dos parâmetros da argila porosa vermelha mole a média

E Mpa	Δ (%)	ϕ graus	Δ (%)	c kPa	Δ (%)
25,00	67%	36,00	20%	30,00	50%
15,00	0%	34,00	13%	28,00	40%
8,00	-47%	32,00	7%	26,00	30%
		30,00	0%	24,00	20%
		28,00	-7%	22,00	10%
		26,00	-13%	20,00	0%
		24,00	-20%	18,00	-10%
				16,00	-20%
				14,00	-30%
				12,00	-40%
				10,00	-50%

3.2.3 Análise paramétrica do grampo vertical

A partir da compreensão preliminar de qual a condição de solo, no que tange à sua deformabilidade e resistência, que o grampo vertical terá uma maior efetividade na redução de deslocamentos, adotou-se um tipo de solo, que será detalhado no tópico de resultados, para análises paramétricas do grampo vertical.

As análises paramétricas do grampo vertical contemplaram seis variações:

I. Diâmetro

Adotou-se modelos com 7,5 cm; 10 cm; e 15 cm de diâmetro de grampo vertical

II. Comprimento do grampo vertical

Analisou-se a influência do comprimento do grampo vertical, adotando-se cenários com 10,5; 11,5; 12,5; 13,5; 14,5; e 15,5 m.

III. Inclinação

Em relação à inclinação, optou-se por: 0°; 5°; e 10° em relação ao paramento de concreto. A Figura 45 ilustra as variações de ângulo adotadas.

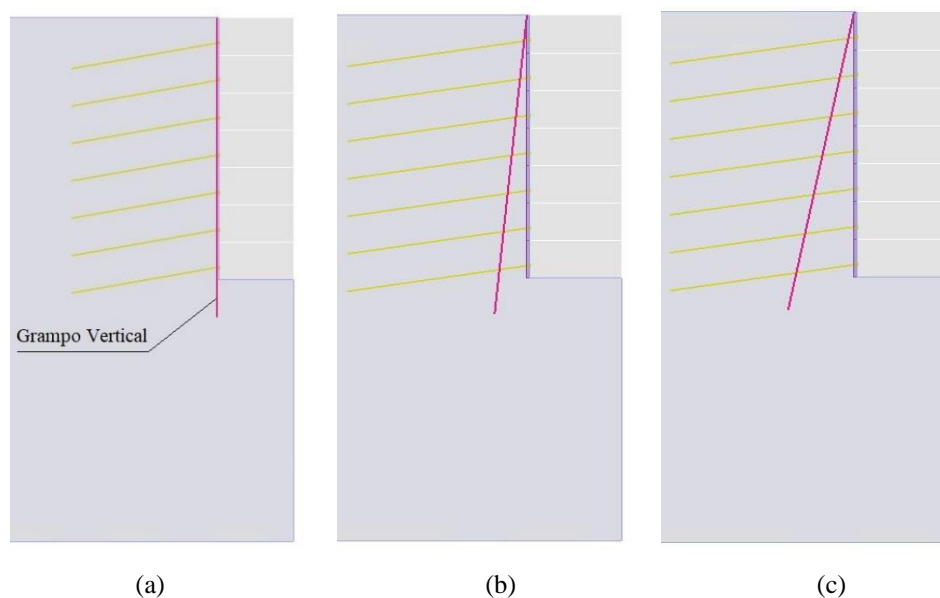


Figura 45 – Variação nos ângulos do grampo vertical em relação ao paramento: 0° (a); 5° (b); e 10° (c)

IV. Quantidade de linhas de grampo vertical

Desenvolveram-se cenários com 1; 2; e 3 linhas de grampos verticais. O espaçamento adotado entre as linhas foi de 0,50 m.

V. Comprimento dos grampos sub-horizontais

Levando em consideração que a redução dos deslocamentos devido à escavação e execução do solo grampeado não será somente influenciada pela adoção de grampos verticais, desenvolveu-se também modelos considerando o grampo vertical, porém com diferentes comprimentos de grampos sub-horizontais, sendo estes: 6; 7; 8; e 9 m. Dessa forma será possível identificar o impacto do grampo vertical na redução dos deslocamentos com o aumento do grampo sub-horizantal

VI. Influência do espaçamento horizontal do grampo vertical

Por fim, verificou-se qual seria a influência de aumentar o espaçamento horizontal do grampo vertical nos deslocamentos horizontais. Considerou-se o espaçamento de 1,50 m e 3,0 m.

No que tange à posição dos grampos verticais, estes foram posicionados entre os grampos sub-horizontais, resultando também no espaçamento horizontal de 1,50 m. No caso da análise da influência do espaçamento horizontal do grampo vertical, adotou-se um espaçamento de 3,0 m. Ademais, visto que somente foi considerado uma fatia do modelo de 3,0 m de largura e que o mesmo deve ser simétrico, para elaboração das análises foi necessário considerar nas fronteiras meio grampo vertical, conforme a Figura 46 demonstra. Quando adotado 3,0 m de espaçamento horizontal para o grampo vertical isso não se aplica, pois considera-se somente o grampo vertical central.

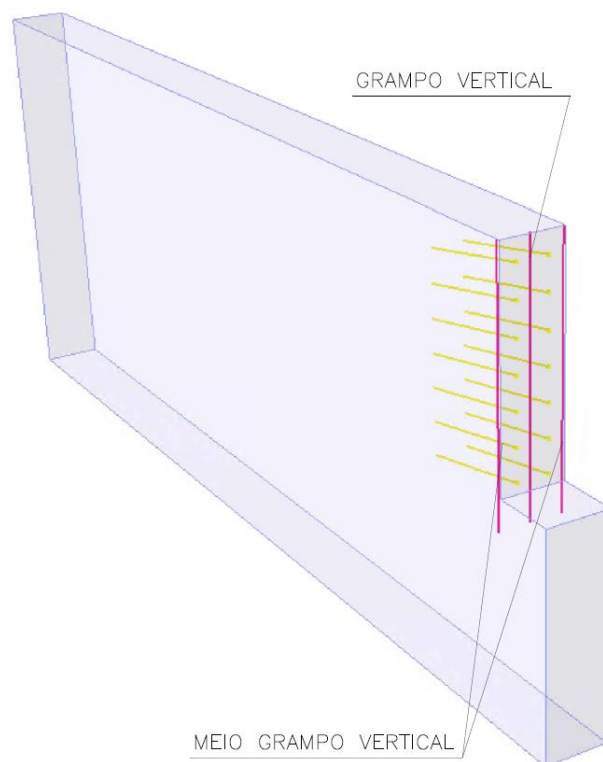


Figura 46 - Consideração de meio grampo vertical no modelo

3.2.4 Tipo de elemento para o grampo vertical

Visto que durante o processo de escavação o grampo vertical será solicitado por esforços cortantes, normais e momentos fletores, optou-se por utilizar o elemento *Forepole* para sua simulação, que é um elemento de viga unidimensional que considera a interação com o solo apenas pelo atrito lateral. Dessa forma, por analogia, o grampo vertical pode ser considerado

como uma estaca inserida no maciço de solo. A conexão com os elementos tetraedros da malha é realizada através da criação automática de dois pontos nodais, um para o elemento de viga e outro para o elemento de solo, conforme pode ser observado na Figura 47.

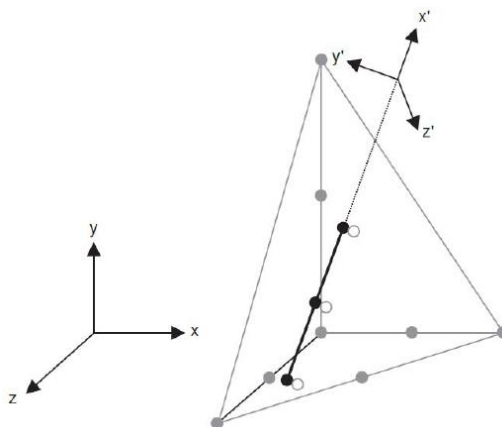


Figura 47 - Geometria do elemento de viga na malha de elemento finitos (Rocscience, 2019b)

É possível também considerar a resistência de ponta do elemento através de um elemento de mola na sua base, sendo que, neste caso, o elemento é denominado como *Pile*. Contudo, na presente pesquisa o efeito da ponta foi desconsiderado.

Os parâmetros necessários para a modelagem do *Forepole* são divididos em: i) parâmetros do elemento de viga; ii) parâmetros de interação solo-elemento; iii) critério de ruptura. A seguir estão descritas as considerações para cada um desses parâmetros.

3.2.4.1 Parâmetros do elemento de viga

Os parâmetros necessários no RS3 para a modelagem de um elemento de viga são: Módulo de elasticidade (E); área (A); momento de inércia (I), e coeficiente de Poisson (ν). O módulo de elasticidade seguiu a mesma formulação de Singh e Babu (2010) apresentada no tópico 3.1.4. Para a área e momento de inércia do meio grampo vertical, adotou-se a metade dos valores utilizados para o grampo vertical. O coeficiente de poisson adotado foi de 0,20 para todos os casos. Na Tabela 4 estão resumidos os valores utilizados nos modelos.

Tabela 11 - Parâmetros do elemento de viga para os grampos verticais

Diâmetro do grampo (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Área (m ²)	Momento de Inércia (m ⁴)
7,5	41.978	4,42E-03	1,55E-06
10	33.063	7,85E-03	4,91E-06
15	26.694	1,77E-02	2,49E-05
Meio grampo 7,5	41.978	2,21E-03	7,77E-07
Meio grampo 10	33.063	3,93E-03	2,45E-06
Meio grampo 15	26.694	8,84E-03	1,24E-05

3.2.4.2 Critério de ruptura

Com o *Forepole* é possível considerar um critério de ruptura para a interface entre o solo-elemento, sendo a resistência máxima por atrito lateral. Os critérios de ruptura são usados para determinar se a interface se comporta na região elástica ou plástica. Para permanecer na região elástica, a força cortante em um determinado ponto deve ser menor que sua resistência ($T_{m\acute{a}x}$). Existem três alternativas para determinar o $T_{m\acute{a}x}$ no RS3:

- 1) Distribuição Linear: a resistência no topo e na base do elemento é informada pelo usuário, sendo assim distribuída linearmente ao longo da profundidade;
- 2) Envoltória de Mohr-Coulomb: o usuário fornece os valores de adesão (a) e ângulo de atrito da interface (ϕ) e o programa utiliza a envoltória de Mohr-Coulomb para o cálculo da resistência, conforme a equação (8) a seguir:

$$\tau_{m\acute{a}x} = a + \sigma_n * tg(\phi) \quad (8)$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = resistência ao cisalhamento (kPa)

σ_n = tensão normal (kPa)

- 3) Multilinear: a resistência ao longo do elemento é informada pelo usuário, porém com valores variáveis entre o topo e a base.

A opção escolhida para a presente pesquisa foi a de envoltória de Mohr-Coulomb, visto que não há informações sobre provas de carga que poderiam embasar a utilização das outras opções. No que se refere aos valores de coesão e ângulo de atrito, assumiu-se para todos os modelos os mesmos valores dos parâmetros de solo.

Para obter o valor de $T_{m\acute{a}x}$ a partir de $\tau_{m\acute{a}x}$ o RS3 utiliza a seguinte equaao (9):

$$T_{m\acute{a}x} = \pi * D * L * [a + K_0 * \sigma_n * tg(\phi)] \quad (9)$$

Onde:

D = di\ametro do grampo vertical (m), informado pelo usu\ario

L = comprimento do grampo vertical (m), informado pelo usu\ario

K_0 = coeficiente de empuxo no repouso, informado pelo usu\ario

A utilizaao da equaao (9) tamb\em \e citada por Poulos e Davis (1980) e Cernica (1995). A partir dessa consideraao, como exemplo, a Tabela 12 resume as resist\encias m\aximas para o grampo vertical e meio grampo vertical, com 12,0 m de comprimento, utilizando os par\ametros de solo resumidos na Tabela 6.

Tabela 12 - Resist\encia m\axima dos grampos verticais por atrito lateral

Di\ametro do grampo (cm)	Resist\encia M\axima (kN)
7,5	126
10	168
15	253
Meio grampo 7,5	63
Meio grampo 10	84
Meio grampo 15	126

Com o intuito de analisar os valores citados, no T\opico 3.2.4.4 apresenta-se os resultados de um modelo hipot\etico de uma estaca sendo carregada verticalmente.

3.2.4.3 Interaao solo-grampo

A interaao solo-elemento \e simulada atrav\es de elementos de mola que realizam a ligaao dos pontos nodais do solo e do elemento. Sendo um elemento de mola, o RS3 solicita dois par\ametros para a simulaao: Rigidez normal (*Normal Stiffness*) e Rigidez axial (*Shear Stiffness*). A seguir se encontra a descriao sobre a influ\encia desses dois par\ametros na interaao solo-elemento. Vale destacar que os modelos que ser\ao apresentados a seguir t\em como intuito t\ao somente a demonstraao como os valores de rigidez normal e axial influenciam em elementos de viga em modelos no RS3, ou seja, n\ao est\ao validando ou retro-analisando o modelo da Gerscovich et al. (2005).

3.2.4.3.1 Rigidez Normal (k_n)

A rigidez normal se refere ao parâmetro que simula o comportamento da resistência do solo em função do deslocamento lateral do elemento, quando solicitado horizontalmente por uma força. Ou seja, ela vai definir qual será o esforço necessário para o elemento deslocar uma unidade lateralmente. Esse comportamento pode ser observado na curva p-y apresentado na Figura 44.

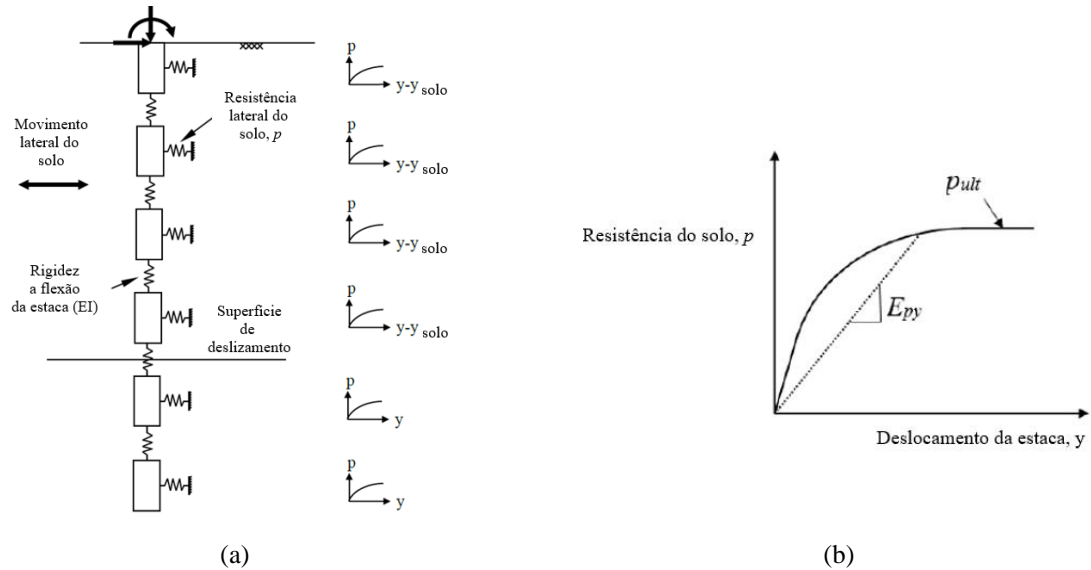


Figura 48 – Modelos de molas para simulação da resposta lateral (a) e curva p-y (b) do comportamento solo-grampo (RSPile, 2020)

O valor de k_n pode ser obtido através da curva p-y traçando-se uma reta tangente ou secante (vide Figura 48), obtendo-se, assim, o valor de esforço por metro (kN/m) pelo deslocamento (m), resultando na unidade de kPa - conforme solicitado pelo RS3.

Entretanto, na presente pesquisa adotou-se uma premissa de que os pontos nodais do solo e do elemento de viga terão deslocamentos iguais, ou seja, não haverá deslocamentos relativos laterais entre o grampo vertical e solo. Essa premissa se deve ao fato que em virtude da proximidade do grampo vertical com a escavação, provavelmente seus deslocamentos horizontais serão similares aos do solo. Para tanto, adotou-se um valor de $1,0 \times 10^7$ kPa para k_n em todos os modelos, considerado elevado e que representa tal comportamento.

No Tópico 3.2.4.4 apresenta-se os resultados de um modelo hipotético de uma estaca sendo carregada horizontalmente, sendo, assim, analisada a premissa adotada.

3.2.4.3.2 Rigidez Axial (k_s)

Para representar a interação com o solo no sentido axial, no RS3 o *Forepole* é discretizado em diversos segmentos compostos cada um por três elementos de mola, sendo que dois representam a rigidez estrutural do elemento de viga e o outro a rigidez do contato com o solo (k_s), conforme demonstrado na Figura 49(a). A unidade de k_s é kPa sendo descrita pela força/comprimento do elemento/deslocamento. Dessa forma, quando ocorre um deslocamento na interface do elemento será mobilizado uma força pelo seu comprimento (tração ou compressão).

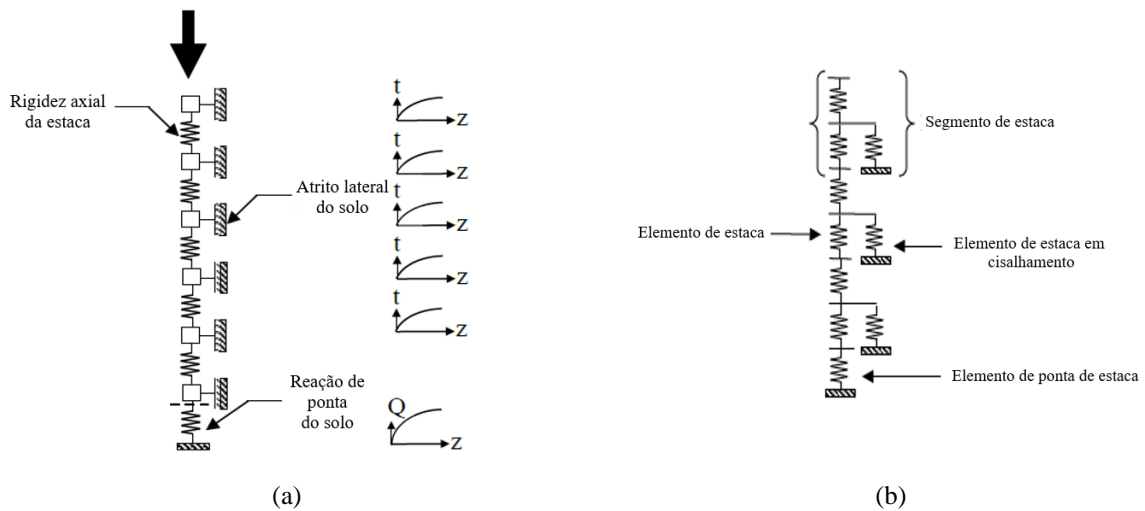


Figura 49 - Discretização do elemento de viga no RS3 (RSPile, 2020a, 2020b)

O k_s pode ser obtido através da curva t - z , traçando-se uma reta tangente ou secante na mesma, obtendo-se, assim, o valor de esforço por metro (kN/m) pelo deslocamento (m), resultando na unidade de kPa – vide Figura 49. No entanto, para a presente pesquisa, visto que não há curvas t - z de referência, optou-se por utilizar a equação (10) para obtenção de k_s :

$$k_s = \frac{Q/L}{D_{ef} * D/100} \quad (10)$$

Onde:

Q = resistência máxima do grampo vertical por atrito lateral (kN)

L = comprimento total do grampo vertical (m);

D_{ef} = porcentagem de deformação em relação ao diâmetro do grampo (%);

D = diâmetro do grampo vertical (m).

É importante ressaltar que a equação (10) foi proposta a partir de uma equação similar utilizada por Pascoal (2015) na análise da interação de fundações sendo carregadas verticalmente utilizando o RS3. O autor, no caso, considerou Q sendo distribuído pela área superficial da estaca, pois na versão do RS3 na época do estudo a unidade de k_s era kPa/m. A diferença, então, da equação (10), com a nova consideração de k_s com unidade de kPa, foi a distribuição de Q por metro linear da estaca.

Para o valor de Q utilizou-se as premissas descritas no tópico 0 . O parâmetro D_{ef} é a porcentagem de deformação em relação ao diâmetro de uma estaca para a completa mobilização do atrito lateral durante um carregamento axial (Erlich e Zirlis, 2016). Segundo Décourt, Albieiro e Cintra (2016), esse valor pode variar entre 0,5 a 2% para estacas em solos argilosos e 1 a 3% para estacas em solos granulares. Para a presente pesquisa, de forma mais conservadora optou-se por utilizar o valor de 0,5%.

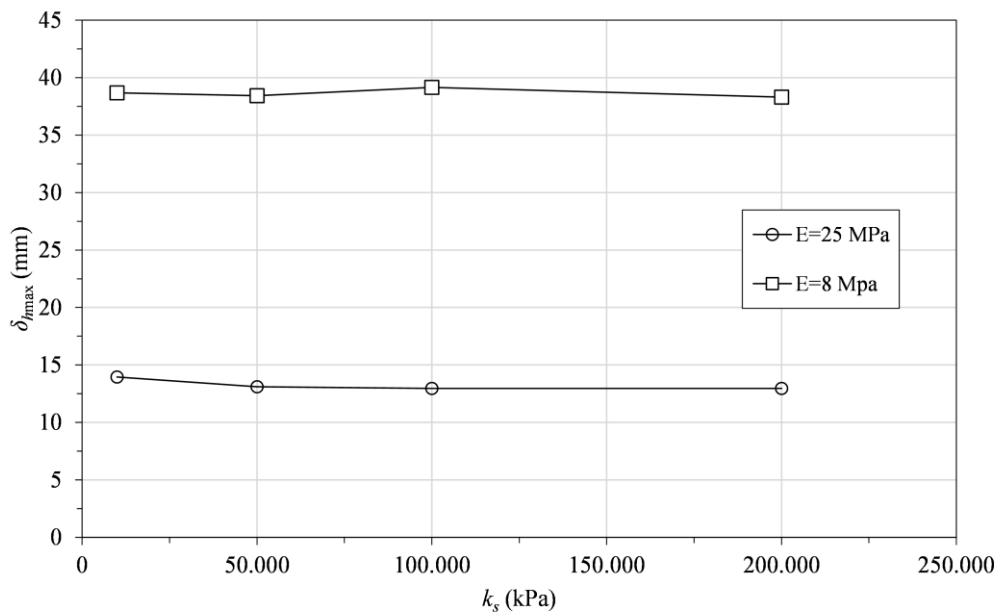
Como se nota, o valor de k_s a partir da formulação adotada será dependente dos parâmetros de resistência do maciço, acarretando, assim, na necessidade de adotar um valor para cada cenário da análise de sensibilidade do solo. No entanto, com o intuito de focar somente na mudança dos parâmetros de resistência do solo optou-se por analisar preliminarmente qual seria a influência do valor de k_s nas análises no que tange aos deslocamentos e assim avaliar se seria possível adotar um valor padrão para todos os modelos.

Analisando as variações paramétricas de solo propostas no capítulo 3.2.2 o limite superior e inferior do solo da primeira camada até os 10,5 m de profundidade (argila porosa vermelha mole a média) em termos de deformabilidade e resistência é resumido na Tabela 13. A partir desses parâmetros de solo realizaram-se 8 modelos de solo grampeado com grampo vertical e variando somente o valor de k_s de 10×10^3 até 200×10^3 kPa, conforme a Tabela 13 resume. O comprimento do grampo vertical foi de 12,50 m para todos os modelos, 0° de inclinação, e o solo abaixo de 10,50 m de profundidade foi aquele resumido na Tabela 9.

Tabela 13 - Limite superior e inferior do solo e variação de k_s

Solo	E Mpa	ν	γ kN/m ³	c kPa	ϕ graus	k_s kPa
Limite inferior	8	0,30	15,0	10	30	10x10 ³ 50x10 ³
Limite superior	25,0	0,25	15,0	28	30	100x10 ³ 200x10 ³

A partir disso, analisaram-se as diferenças de deslocamentos horizontais máximos ($\delta_{h\max}$) para a última etapa de escavação de acordo os diferentes k_s . A Figura 50 mostra os resultados obtidos. Como pode ser observado, os deslocamentos horizontais máximos para as duas configurações de solo, com E=8Mpa e 25Mpa e diferentes faixas de k_s foi praticamente nula. Assim, constata-se que k_s tem pouca influência nos modelos.

Figura 50 - Resultado de deslocamento horizontais máximos de acordo com a variação de k_s

Nesse sentido, para a obtenção do valor de k_s observou-se também seu valor máximo e mínimo de acordo com as variações paramétricas do solo descrita no capítulo 3.2.2. O valor mínimo e máximo é de 23.287,55 e 34.597,29 kPa, respectivamente, conforme a Tabela 14 resume. A partir desses valores optou-se por adotar um valor de 25.000 kPa para todas as análises.

Tabela 14 - Valor de k_s mínimo e máximo

Solo	E Mpa	ν	γ kN/m³	c kPa	ϕ graus	k_s kPa
Limite inferior	8	0,30	15,0	10	30	23.287,55
Limite superior	25,0	0,25	15,0	28	30	34.597,29

3.2.4.4 Análise dos critérios adotados

Com o intuito de analisar as premissas e valores citados nos tópicos anteriores, elaborou-se modelos simples do elemento *Forepole* sendo carregado verticalmente e horizontalmente. A seguir se encontra uma descrição dos modelos e resultados obtidos.

3.2.4.4.1 Carregamento vertical

Para analisar os valores apresentados na Tabela 12 elaborou-se 6 modelos (três considerando o diâmetro inteiro e três com meio diâmetro) de *Forepole*, com 12,0 m de comprimento, sendo carregado verticalmente com diferentes estágios no RS3, sendo que para cada estágio incrementou-se em 10 kN o valor do carregamento. Na análise dos resultados considerou-se que a ruptura do elemento ocorreria quando não houvesse convergência do modelo – ou seja, não ocorre um estado de equilíbrio do modelo com o número de interações estipuladas de 1.000. Os parâmetros para o elemento de viga foram aqueles descritos na Tabela 11. O valor de k_n foi de $1,0 \times 10^7$ kPa e k_s foi de 25.000 kPa, para todos os modelos.

Na Figura 51 demonstra-se uma visão geral do modelo com a geometria, discretização da malha e condições de contorno e na Figura 52 os resultados.

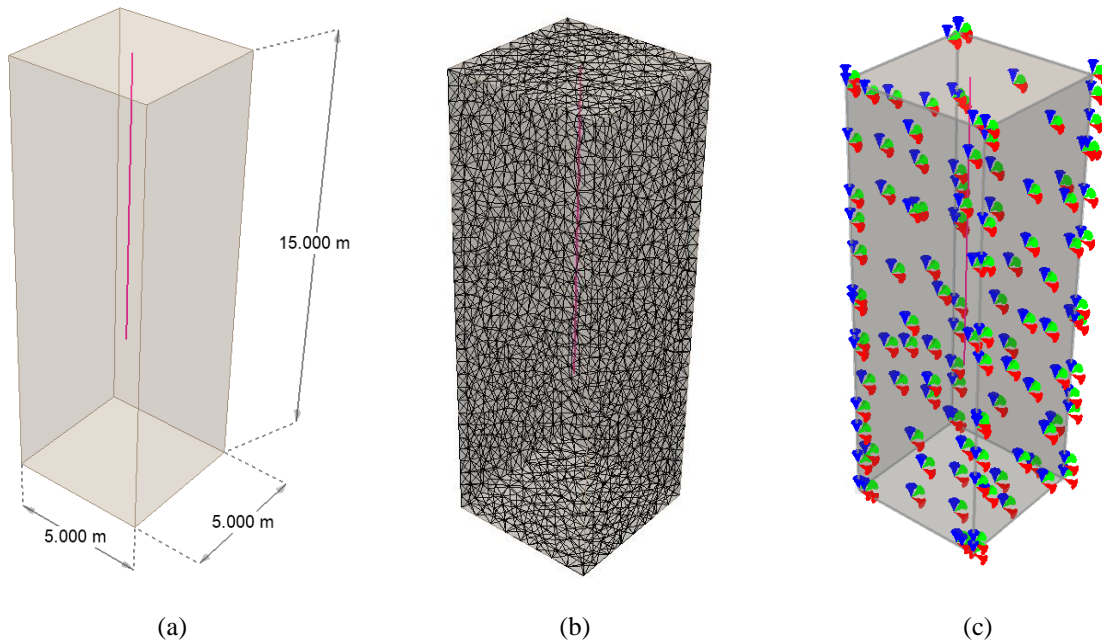


Figura 51 - Modelo de estaca sendo carregada verticalmente no RS3. Dimensões no modelo (a); Discretização da malha de elementos finitos (b); e Condições de contorno (c)

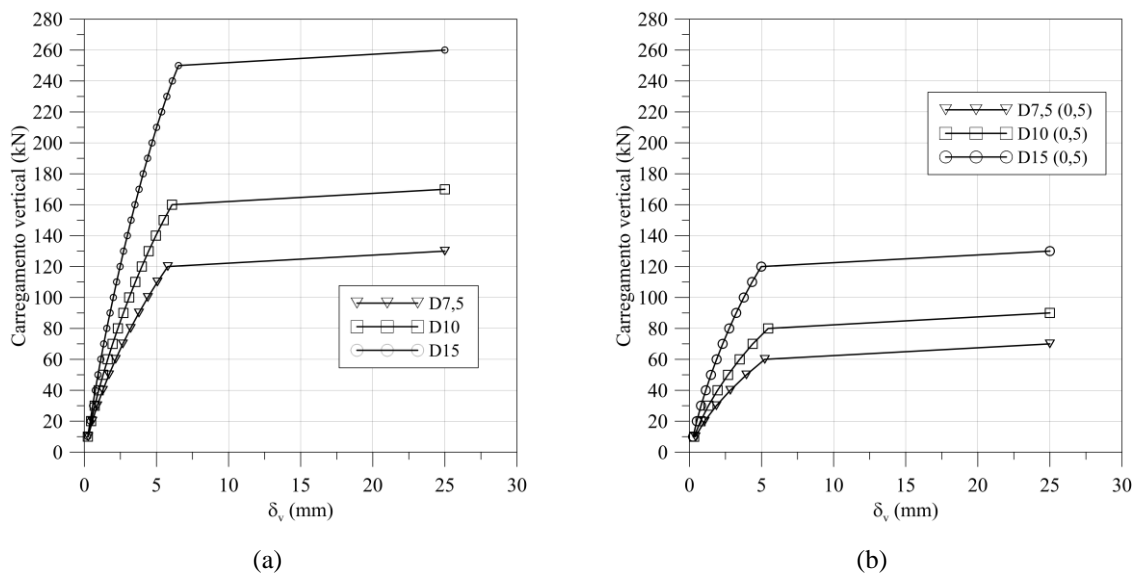


Figura 52 - Resultados dos modelos de carregamento vertical. Modelo com diâmetro inteiro (a) e Modelo com meio diâmetro (b)

Os resultados apresentados na Figura 52 são referentes aos deslocamentos verticais (δ_v) obtidos no topo do elemento ao longo dos estágios de carregamento. Nota-se, primeiramente, que as curvas Carregamento x deslocamento em todos os modelos foram similares, ocorrendo primeiramente um trecho linear crescente e depois um trecho retilíneo horizontal, resultando,

assim, em um comportamento bi-linear. O início do trecho horizontal representa o ponto onde o modelo não converge mais, sendo que os valores desses pontos foram muito próximos àqueles obtidos analiticamente e resumidos na Tabela 12.

3.2.4.4.2 Carregamento Horizontal

Para analisar o comportamento horizontal do elemento *Forepole* e validar a premissa do valor de k_n de $1,0 \times 10^7$ kPa, criaram-se dois modelos no RS3 de uma estaca sendo carregada horizontalmente no topo. Um modelo utilizou o elemento *Forepole* e o outro o elemento *Beam*, que é um elemento de viga, porém, sem a consideração do elemento de interface, ou seja, sem deslocamentos relativos entre o solo e o elemento de viga. Então, caso os resultados de deslocamento horizontal, força cortante e momentos fletores entre os modelos forem próximos o valor de k_n adotado será considerado válido. A geometria, discretização da malha e condições de contorno foram as mesmas apresentadas na Figura 51.

É importante ressaltar que o elemento *Beam* não foi escolhido para a simulação do grampo vertical pois não seria possível simular a interação solo-grampo no sentido vertical tampouco considerar um critério de ruptura, sendo consideradas análises relevantes.

Os parâmetros do solo foram os mesmos descritos na Tabela 6. Já os parâmetros das estacas estão resumidos nas Tabelas 15 e 16.

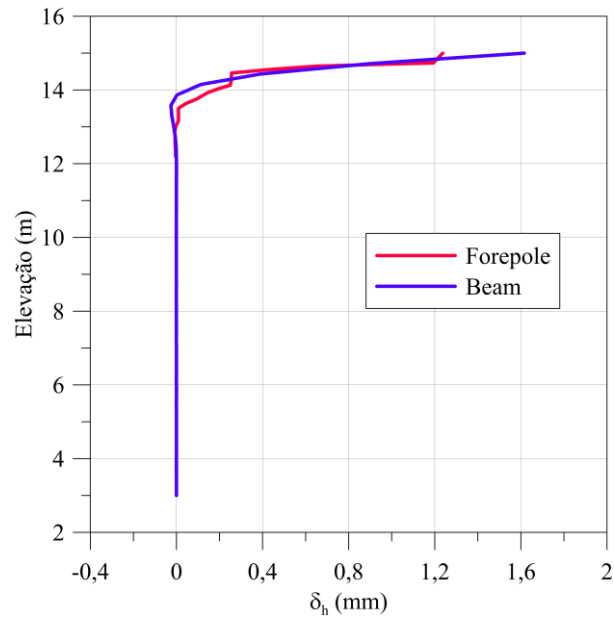
Tabela 15 - Propriedades da modelagem com elemento *Forepole*

Forepole	
Carga no topo (kN)	10,00
Diâmetro da estaca (m)	0,15
Comprimento (m)	12,00
Módulo de elasticidade (kPa)	$2,67 \times 10^7$
Poisson	0,20
Momento de inércia (m ⁴)	$2,49 \times 10^{-5}$
Área (m ²)	0,018
Rigidez normal (kPa) – K_n	$1,00 \times 10^7$
Rigidez axial (kPa) - K_s	25.000

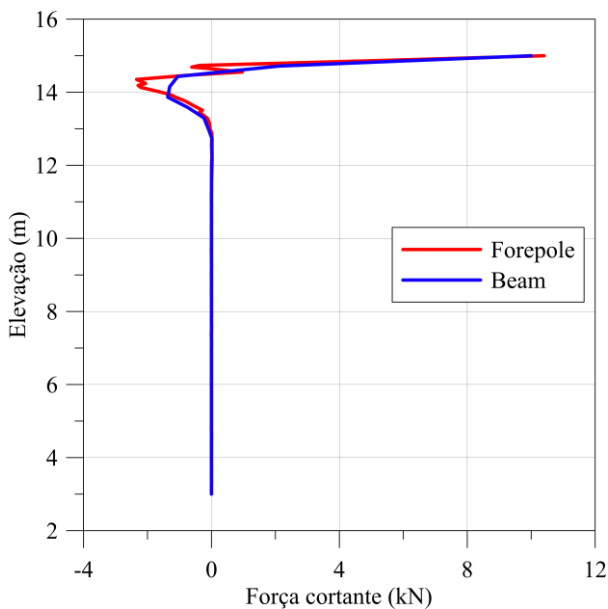
Tabela 16 - Propriedades da modelagem com elemento *Beam*

Beam	
Carga no topo (kN)	10,00
Diâmetro da estaca (m)	0,15
Comprimento (m)	12,00
Módulo de elasticidade (kPa)	$2,67 \times 10^7$
Poisson	0,20

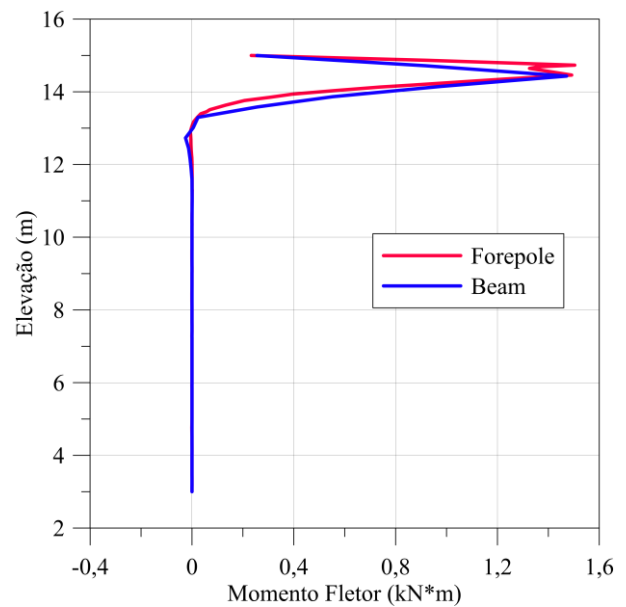
Beam	
Momento de inércia (m ⁴)	2,49x10 ⁻⁵
Área (m ²)	0,018



(a)



(b)



(c)

Figura 53 – Resultados dos modelos de estaca sendo carregada horizontalmente no RS3. Deslocamentos horizontais (a); Força cortante (b); e Momento fletor (c)

A Figura 53 demonstra os resultados de momento fletor, força cortante e deslocamentos horizontais (δ_h) ao longo do comprimento do elemento. Nota-se que uma similaridade substancial entre os modelos, tanto no que se refere aos valores quanto no comportamento do

elemento inserido no meio contínuo. Enquanto que o valor máximo de momento fletor para o modelo com *Forepole* foi de 1,50 kNm o modelo com elemento *Beam* resultou em 1,47 kNm. Para a força cortante, o modelo com *Forepole* resultou em um valor máximo de 10,40 kN, enquanto que o modelo com *Beam* o resultado foi de 10,00 kN. Por fim, para os δ_h , o valor máximo para o *Forepole* foi de 1,24 mm, enquanto que para o *Beam* foi de 1,61 mm. Portanto, considerou-se o valor de rigidez normal de $1,0 \times 10^7$ kPa apropriado para a modelagem do grampo vertical, baseando-se na premissa de desconsideração de deslocamento relativo entre o solo e o grampo vertical.

3.2.5 Análise dos resultados

Em posse dos modelos com grampo vertical, estes serão avaliados e comparados com os modelos sem grampo vertical em relação aos deslocamentos horizontais e verticais finais, distorção angular e deformabilidade horizontal e, conseqüentemente, os possíveis danos às estruturas lindeiras à escavação de acordo com as premissas resumidas no tópico 2.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos modelos desenvolvidos e descritos no capítulo de Materiais e Métodos. Primeiramente, serão apresentados os modelos 2D e 3D de solo grampeado sem a consideração do grampo vertical a fim de compatibilizar com os modelos numéricos de Gerscovich *et al.* (2005). Posteriormente, apresenta-se os resultados dos modelos com grampo vertical da modelagem tridimensional.

4.1 Modelo sem grampo vertical

Conforme citado previamente, os modelos bidimensional e tridimensional sem grampo vertical foram analisados com os resultados obtidos no estudo bidimensional de Gerscovich *et al.* (2005) em termos de deslocamentos horizontais a 1,0 m de distância da face, bem como a distribuição dos esforços axiais máximos nos grampos - ambos na última fase de escavação.

A Figura 54 demonstra os resultados de deslocamentos horizontais na última fase de escavação no RS2, RS3 e os estudos de Gerscovich *et al.* (2005).

Importante ressaltar que Gerscovich *et al.* (2005) elaboraram comparações com diferentes tipos de suporte para simulação do grampo sub-horizontal, sendo que as tipologias que mais se assemelham com o comportamento do *Fully Bonded*, optado no presente estudo, foi o “Cable element” do FLAC (denominado como “FLAC” na Figura 54) e o Geotêxtil do PLAXIS sem interface (denominado “PLAXIS” na Figura 54).

Nota-se que os resultados do RS2 e RS3 mostram uma concordância do comportamento e valores com os modelos do FLAC e PLAXIS, com ligeiras diferenças. Em termos de comportamento, os modelos do RS2 e RS3 se assemelham mais com os resultados do FLAC, tendo um deslocamento maior na parte superior do paramento, característico de uma rotação no sentido horário, em direção à escavação. O deslocamento máximo aproximado no FLAC é de 14,3 mm, sendo que no RS2 é de 14,2 mm e no RS3 de 14,0 mm.

Em comparação com o modelo do PLAXIS, os comportamentos são ligeiramente divergentes, sendo que no caso do PLAXIS os deslocamentos demonstram um comportamento de rotação no sentido anti-horário em relação à escavação, resultando em maiores deslocamentos no meio do paramento. Apesar disso, as diferenças foram consideradas insignificantes em termos práticos. O deslocamento máximo aproximado no modelo do PLAXIS é de 14,4 mm.

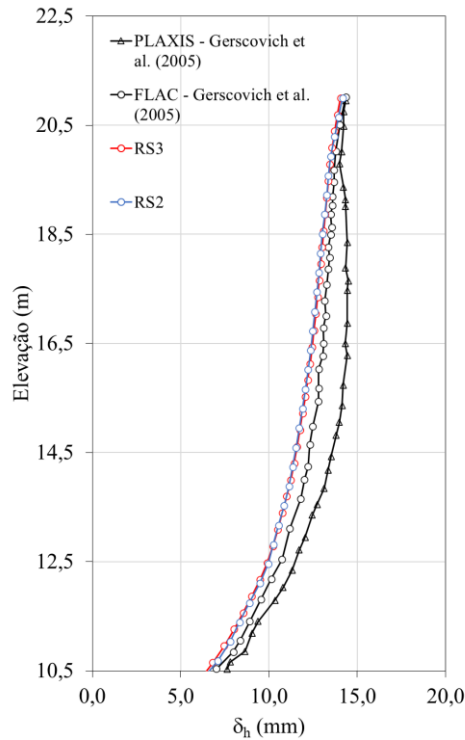


Figura 54 - Resultados de deslocamento horizontal da última fase de escavação no RS2 e RS3

Os resultados de força axial máxima, na última fase de escavação, nos grampos sub-horizontais ao longo do paramento estão representados na Figura 55. Como pode ser observado, os maiores valores de tensão axial se encontram nos grampos inferiores. Comportamento similar foi obtido por Singh & Babu (2010), Lanzieri (2019) e Fan & Luo (2008).

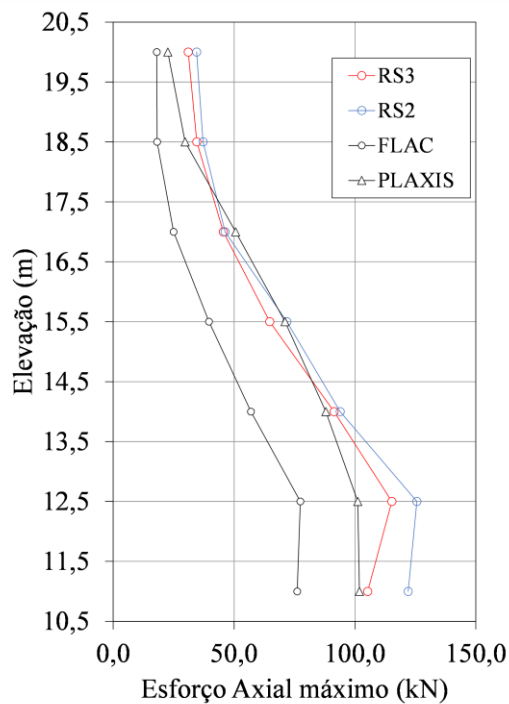


Figura 55 - Esforços máximos nos grampos sub-horizontais ao longo do paramento

Em relação ao estado de tensões do solo, é possível analisar os resultados com base no coeficiente K proposto por Clouterre (1991), conforme a equação 11:

$$K = \frac{T_{\max} \cos \theta}{\gamma z S_v S_h} \quad (11)$$

Onde:

K = coeficiente adimensional

T_{\max} = esforço axial máximo no grampo (kN);

$\cos \theta$ = inclinação do grampo sub-horizontal;

γz = tensão vertical efetiva no ponto de máxima tensão do grampo (kPa);

$S_v S_h$ = espaçamento vertical e horizontal entre os grampos.

A Figura 56 mostra os valores de K obtidos a partir dos modelos do RS2 e RS3, comparado com o coeficiente de empuxo ativo (K_a) e repouso (K_0). Na figura o eixo vertical é a relação entre a profundidade da escavação (Z) e a altura do paramento (H). Observa-se que os grampos na metade superior do paramento são maiores que K_0 e a partir do quinto grampo ocorre uma diminuição. Isso indica que o estado de tensão no solo na região de tração máxima é maior ou menor que o empuxo em repouso ou ativo. Resultados similares foram obtidos por Clouterre (1991) como pode ser observado na Figura 57.

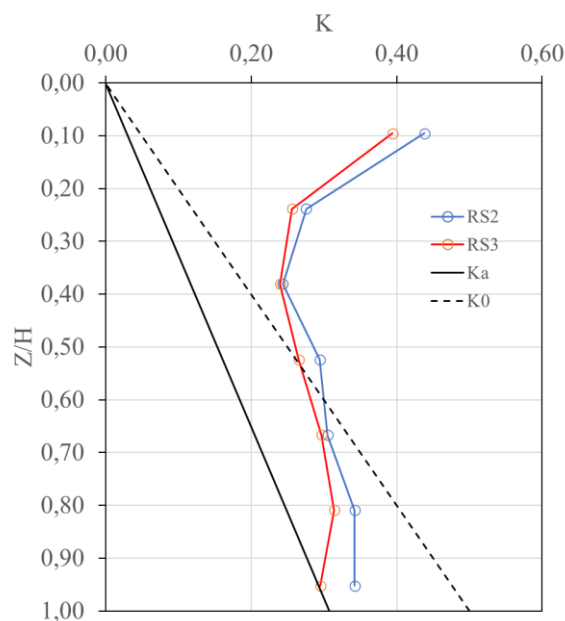


Figura 56 - Coeficiente K a partir dos resultados do RS2 e RS3

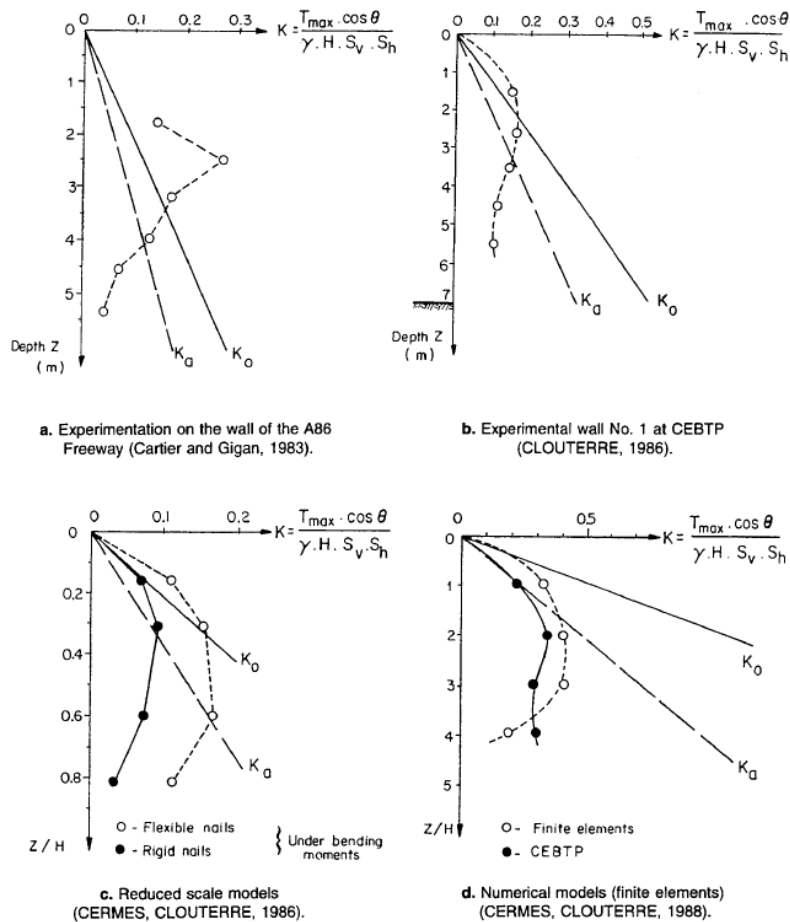


Figura 57 - Gráfico de K em função da profundidade (Clouterre, 1991)

Em relação aos valores de tensão máxima nos grampos, os modelos no RS2 e RS3 apresentaram resultados muito similares, exceto nos dois últimos grampos, e mais aproximados com o modelo do PLAXIS. O valor máximo no FLAC é de aproximadamente 78 kN; o do PLAXIS é de 102 kN; no RS2 é de 125 kN; e no RS3 é de 115 kN.

As diferenças apresentadas nos resultados tanto em termos de deslocamentos horizontais quanto de esforços nos grampos, podem ter ocorrido em razão de alguns fatores, listados abaixo:

- Considerações específicas de cada programa, sendo o FLAC um programa de diferenças finitas e o PLAXIS, RS2 e RS3 programas de elementos finitos. E mesmo esses últimos sendo de elementos finitos, possuem programação própria;
- Discretização da malha entre os modelos;
- Para a representação da malha o PLAXIS considera elementos triangulares de 15 nós, RS2 considera elementos triangulares de 6 nós e o RS3 elementos tetraedros de 10 nós.

Apesar das diferenças, considerou-se que as premissas e valores para o modelo sem grampo vertical no RS2 e RS3 são válidos e, especificamente o modelo RS3, pode ser utilizado para o estudo de modelos com grampo vertical.

4.2 Modelo com grampo vertical

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos modelos com consideração de grampo vertical, conforme descrito no Tópico 0. Primeiramente, serão demonstrados os resultados em relação aos deslocamentos horizontais finais para o solo resumido na Tabela 6. Posteriormente, será apresentada a análise de sensibilidade do solo considerando o grampo vertical. Por fim, apresenta-se a análise paramétrica do grampo vertical e seu impacto nos deslocamentos e danos às estruturas lindeiras.

4.2.1 Modelo com parâmetros de Gerscovich *et al.* (2005)

A Figura 58 apresenta os resultados de deslocamentos horizontais (δ_h) para a última fase de escavação com e sem grampo vertical (GV), considerando os parâmetros de solo da Tabela 6. Para o modelo com grampo vertical, utilizou-se uma linha de grampos verticais sem inclinação, com 15 cm de diâmetro, 12,50 m de comprimento e espaçados entre os grampos sub-horizontais, ou seja, a cada 1,50 m

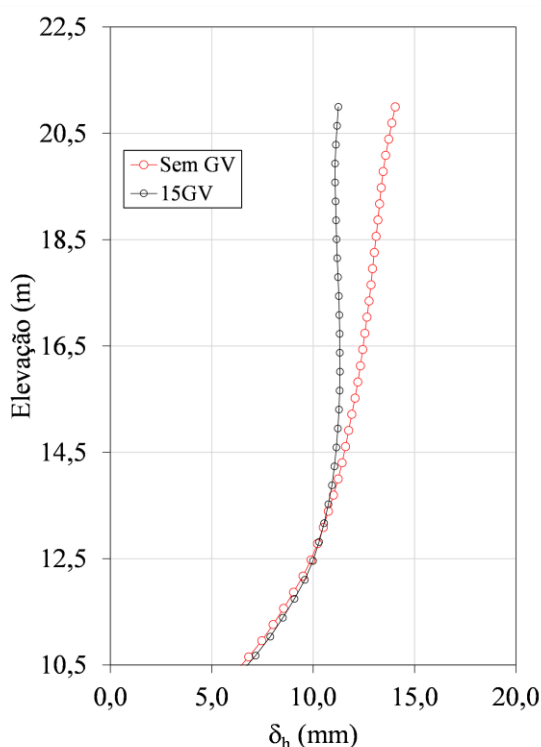


Figura 58 - Deslocamentos horizontais finais com e sem GV, com parâmetros de solo de Gerscovich *et al.* (2005)

Em uma primeira análise, percebe-se que a inclusão de grampos verticais no modelo resultou em uma redução dos deslocamentos horizontais finais. Ademais, essa redução se concentrou mais na metade superior do paramento, a partir da elevação de 15 m.

Contudo, é necessário analisar a magnitude desses deslocamentos a fim de possibilitar uma análise mais detalhada da sua efetividade. Nesse sentido, a Tabela 17 resume os deslocamentos horizontais máximos finais ($\delta_{h\max}$), assim como a redução absoluta ($\Delta\delta_{h\max}$) e percentual ($\Delta\delta_{h\max} \%$) dos deslocamentos em relação à condição sem grampo vertical a qual resultou em um deslocamento máximo horizontal de 14,0 mm no topo da escavação. Vale ressaltar que o modelo com grampo vertical apresentou também deslocamentos horizontais máximos no topo da escavação.

Tabela 17 - Resumo dos deslocamentos horizontais com a inclusão de grampo vertical

Deslocamentos horizontais			
15GV			Sem GV (mm)
$\delta_{h\max}$ (mm)	$\Delta\delta_{h\max}$ (mm)	$\Delta\delta_{h\max} \%$ (%)	
11,2	2,80	20%	14,0

Em posse dos resultados resumidos na Tabela 17 é possível constatar que apesar da redução percentual relativamente expressiva de 20%, em termos de magnitude isso representou uma redução de 2,80 mm, o qual em termos de Engenharia não se considera significativo, principalmente pelos custos de inclusão desse reforço e nas incertezas inerentes de modelos numéricos.

Atribui-se essa redução pouco expressiva em termos de deslocamentos absolutos ao fato que o solo adotado nos modelos de Gerscovich et al.(2005) possui uma deformabilidade baixa para esse tipo de estrutura, apresentando um módulo de elasticidade de 45 MPa. Além disso, a ordem de grandeza dos parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, provavelmente influenciaram também.

Isto posto, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade do solo a fim de verificar em qual condição de solo o grampo vertical teria uma influência maior na redução dos deslocamentos.

4.2.2 Análise de sensibilidade do solo

Conforme já descrito no capítulo 3.2.2, realizou-se uma análise de sensibilidade do solo utilizando o grampo vertical a fim de verificar sua influência na redução dos deslocamentos com diferentes tipos de solo. As variações se deram somente na camada superior do modelo, até 10,50 m, em relação à coesão, ângulo de atrito e módulo de elasticidade. Ademais, em relação ao modelo com os parâmetros de Gerscovich *et al.*(2005) incluiu-se também uma sobrecarga de 10 kPa no topo da escavação. A Figura 59 ilustra o modelo utilizado.

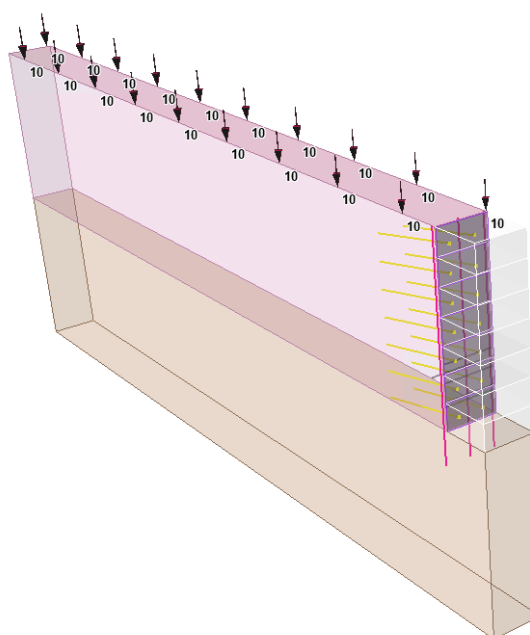


Figura 59 - Modelo base para a análise de sensibilidade do solo

4.2.2.1 Coesão e módulo de elasticidade

Primeiramente elaborou-se modelos com variação de coesão (c) e módulo de elasticidade (E) de acordo com a Tabela 18.

Tabela 18 - Variação de coesão e módulo de elasticidade

Solo	H (m)	E MPa	ν	γ kN/m ³	c kPa	ϕ graus
Argila Porosa Vermelha mole a média	10,5	8 a 25	0,30	15	10 a 30	30
Argila Rija	21,0	25	0,25	18	50	28

A Figura 60 mostra a influência de E e c nos deslocamentos horizontais máximos ($\delta_{h\max}$) tanto em termos absolutos quanto dividido pela altura de escavação (H) para a última fase de escavação.

A partir dos resultados é possível observar que há uma tendência de maior influência do GV na redução dos deslocamentos horizontais em solo menos resistentes e mais deformáveis. Por exemplo, para o caso com $E = 8$ MPa e $c = 10$ kPa a redução dos deslocamentos foi da ordem de 14,2 mm, enquanto que no outro extremo, com $E = 25$ MPa e $c = 30$ kPa isso se reduz para 3,3 mm. No entanto, essa diferença de valor foi mais influenciada pelo módulo de elasticidade do que pela coesão.

Independentemente da diferença de E e c nos resultados finais em termos absolutos, a redução percentual $\delta_{h\max}$ devido à consideração de GV teve uma variação baixa, entre 20% e 27%.

Como forma de ilustrar o comportamento do perfil de deslocamentos horizontais para a última fase de escavação, a Figura 61 mostra o perfil para os casos extremos, com módulo de elasticidade de 8MPa e coesão de 10 kPa; e com 25 MPa e 30 kPa.

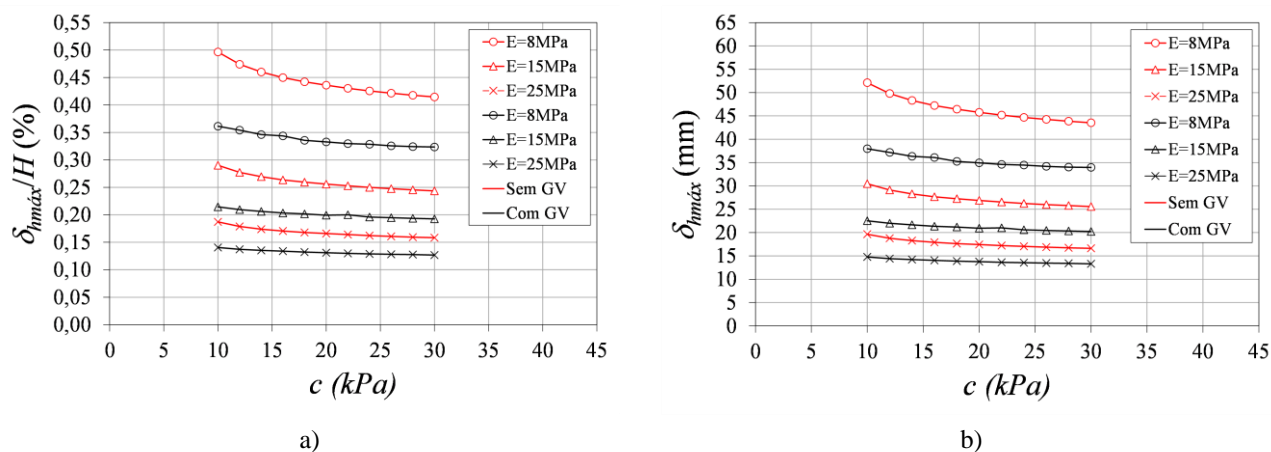


Figura 60 - Influência de E e c nos deslocamentos horizontais finais

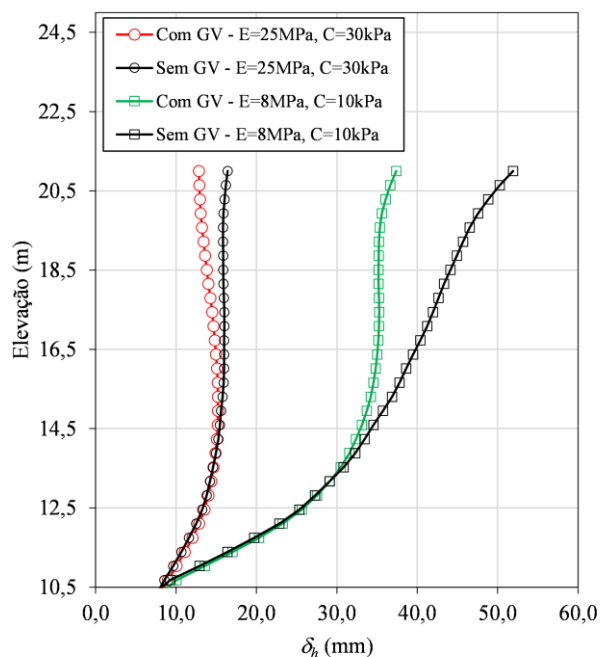


Figura 61 - Perfil de deslocamentos horizontais com e sem grampo vertical. E=8MPa e coesão de 10kPa; E=25MPa e coesão de 30kPa

4.2.2.2 Ângulo de atrito e módulo de elasticidade

A Tabela 19 mostra os parâmetros utilizados para o solo para o estudo de sensibilidade com o ângulo de atrito (ϕ) e E .

Tabela 19 - Variação de ângulo de atrito e módulo de elasticidade

Solo	H (m)	E MPa	ν	γ kN/m ³	c kPa	ϕ graus
Argila Porosa Vermelha mole a média	10,5	8 a 25	0,30	15,0	20	24 a 36
Argila Rija	21,0	25,0	0,25	18,0	50,0	28,0

A Figura 62 mostra a influência de GV , E e ϕ em $\delta_{h,max}$ para a última fase de escavação tanto em termos absolutos quanto dividido pela altura de escavação (H). À semelhança do que aconteceu com a variação de c , à medida que o ϕ diminui, há um aumento dos valores de $\delta_{h,max}$ com e sem GV , mas com magnitudes ligeiramente superiores. Mesmo assim, o valor que mais influenciou os resultados foi o E . Para o caso com E=8 MPa e $\phi = 24^\circ$ a diminuição dos deslocamentos foi da ordem de 13,6 mm, enquanto que no outro extremo, com E=25MPa e $\phi = 36^\circ$ a diminuição foi da ordem de 3,2 mm. Comparando-se com os resultados com variação de coesão, o ângulo de atrito teve uma influência maior nos resultados.

Assim como ocorreu com a variação de E e c , com a variação de ϕ a redução percentual de $\delta_{h\max}$ devido à consideração de GV permaneceu praticamente a mesma para todos os modelos, variando entre 21 e 25%. A Figura 63 ilustra o perfil de deslocamentos para os dois casos extremos.

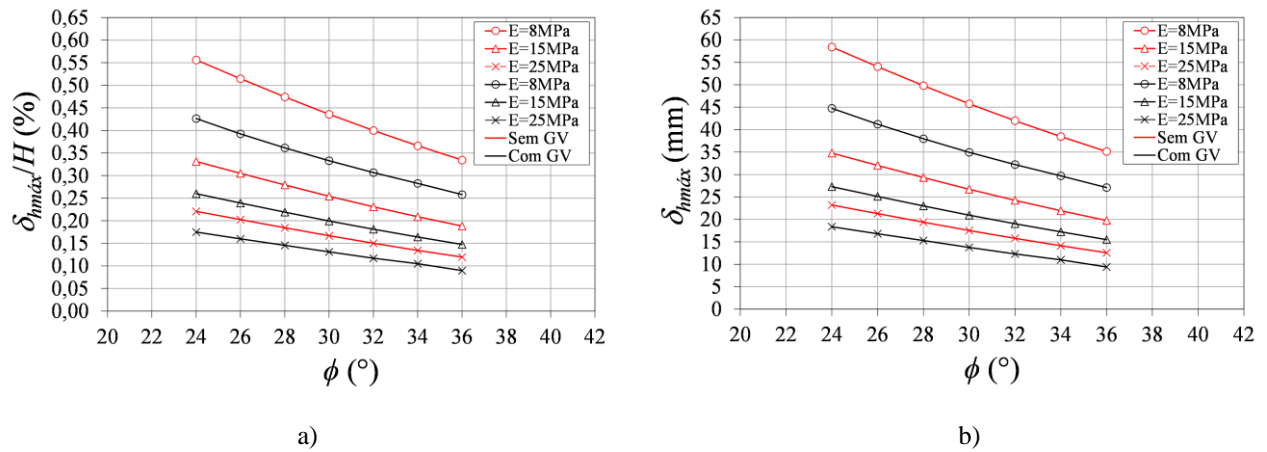


Figura 62 - Influência de E e ângulo de atrito nos deslocamentos horizontais finais

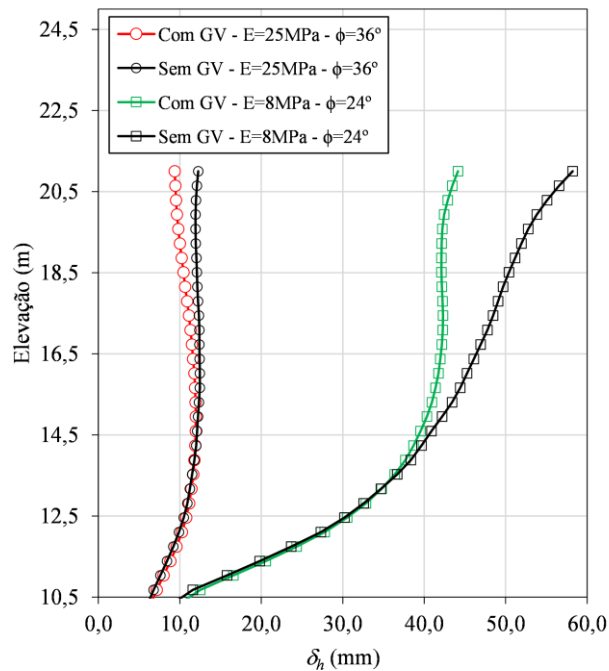


Figura 63 - Perfil de deslocamentos horizontais com e sem grampo vertical. $E=8\text{MPa}$ e ângulo de atrito de 24° ; $E=25\text{MPa}$ e ângulo de atrito de 36°

4.2.2.3 Resumo do estudo de sensibilidade do solo

Como forma de avaliar a influência de cada parâmetro de solo variado elaborou-se gráficos de aranha que correlacionam a variação porcentual de cada parâmetro com a redução do deslocamento horizontal máximo ($\Delta\delta_{h\max}$) em termos absolutos e percentuais, apresentados,

respectivamente, na Figura 64 e Figura 65. É importante destacar que o gráfico de aranha teve como base os resultados de $\Delta\delta_{h_{max}}$ com a variação porcentual de somente um parâmetro, sendo os demais mantidos iguais. Ou seja, para criar um gráfico simétrico, a base de parâmetros (variação porcentual 0) é módulo de elasticidade 15 MPa, coesão de 20 kPa e ângulo de atrito 30° . Portanto, quando se variou o módulo de elasticidade, os demais parâmetros mantiveram-se iguais e assim por diante.

Como já exposto nos tópicos anteriores, pelo gráfico de aranha percebe-se a influência maior do ângulo de atrito e módulo de elasticidade nos resultados, sendo suas inclinações mais acentuadas. A coesão também mostra alguma efetividade, porém de menor magnitude. Observa-se também que apesar da variação na redução dos deslocamentos devido ao grampo vertical em termos absolutos com a variação dos parâmetros, em termos percentuais o valor se manteve praticamente o mesmo.

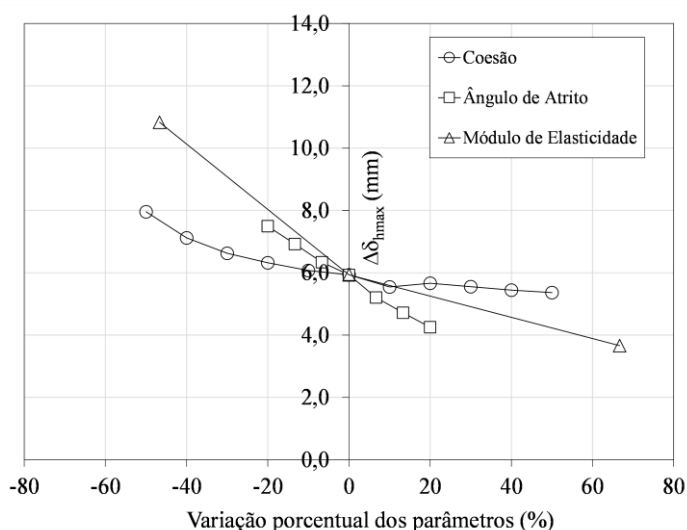


Figura 64 - Variação porcentual de parâmetros x $\Delta\delta_{h_{max}}$ (mm)

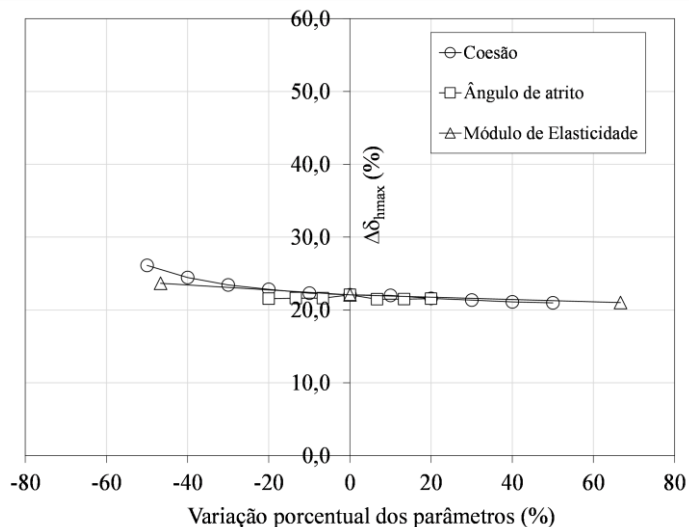


Figura 65 - Variação percentual de parâmetros x $\Delta\delta_{hmax}$ (%)

4.2.3 Análise paramétrica do grampo vertical

A partir da análise preliminar do grampo vertical em diferentes cenários de solo, neste capítulo será apresentado o estudo elaborado com diferentes parâmetros do grampo vertical a fim de ilustrar sua influência quanto aos deslocamentos horizontais, verticais e danos às estruturas adjacentes à escavação.

A análise paramétrica do grampo vertical compreenderá as seguintes variações:

- Diâmetro;
- Ficha;
- Inclinação;
- Quantidade de linhas de grampo;
- Comprimento do grampo sub-horizontal;
- Espaçamento do grampo vertical;

No caso do diâmetro, optou-se por sempre analisá-lo em conjunto com os demais parâmetros listados anteriormente.

4.2.3.1 Parâmetros de solo

Com base nos resultados do estudo apresentado anteriormente onde é indicado que em termos absolutos a redução dos deslocamentos devido ao grampo vertical é mais evidente em solos mais deformáveis e menos resistentes, para o estudo paramétrico do grampo vertical optou-se por adotar os parâmetros de solo resumidos na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros de solo para as análises paramétrica do grampo vertical

Solo	H (m)	E MPa	ν	γ kN/m ³	c kPa	ϕ graus	K_0
Argila Porosa Vermelha mole a média	10,5	8	0,30	15	10	28	0,53
Argila Rijja	21,0	25	0,25	18	50	28	0,53

4.2.3.2 Modelo sem grampo vertical

Utilizando os novos parâmetros de solo, o resultado de deslocamento horizontal e vertical para a última fase de escavação sem grampo vertical estão ilustrados nas Figuras 66 e 67. No caso dos deslocamentos verticais, demonstra-se somente os valores até 25 m de distância da escavação, em razão que a partir dessa região os deslocamentos são insignificantes. Ademais, vale destacar que esses valores foram retirados da face da escavação, visto que nesse local é que haverá o maior deslocamento vertical.

Nota-se que o perfil de deslocamentos verticais apresenta um pequeno soerguimento a uma distância de 5,0 m da face da escavação, comportamento similar ao obtido por Lima (2002). Apesar desse comportamento, considera-se desprezível visto que é de pequena magnitude da ordem de 0,04% H , sendo H a altura do paramento.

Além da análise dos deslocamentos horizontais e verticais, será obtido também a distorção angular (β) e deformação horizontal (ε_h) dos resultados a fim de verificar os possíveis danos às estruturas adjacentes no final da escavação. Para tanto, conforme capítulo 2.5, obteve-se esses valores segundo o esquema ilustrado na Figura 68. Em resumo, os valores de deslocamentos para o cálculo das deformações foram obtidos a partir do trecho mais crítico de deslocamento vertical de cada perfil de deslocamentos. Para o cálculo de β , os valores de deslocamento vertical do Ponto A e B foram obtidos da área mais crítica de cada perfil de deslocamento. Nestes mesmos pontos, também foram obtidos os deslocamentos horizontais, a fim de obter ε_h . O ponto A refere-se ao ponto de inflexão do perfil no trecho mais crítico e o ponto B o deslocamento na face da escavação, e L_{AB} a distância entre os pontos. Esse método foi utilizado não somente para o caso sem grampo vertical, mas também com grampo vertical que será demonstrado nos próximos tópicos. Destaca-se que de forma a simplificar a análise, desprezou-se o possível valor de rotação do corpo rígido (ω) nas análises (ver Figura 34). Portanto, β e ε_h são calculados através das equações (12) e (13):

$$\beta = \Delta\delta v_{AB} / L_{AB} \quad (12)$$

$$\varepsilon_h = \Delta\delta h_{AB} / L_{AB} \quad (13)$$

Onde:

- $\Delta\delta v_{AB}$ = deslocamento vertical relativo entre o Ponto A e B
- $\Delta\delta h_{AB}$ = deslocamento horizontal relativo entre o Ponto A e B

Isto posto, a Tabela 21 resume os deslocamentos horizontais e verticais máximos, bem como a distorção angular e deformação horizontal do modelo sem grampo vertical que será comparado posteriormente com os casos com grampo vertical.

Como pode ser visto, nessa condição os deslocamentos são expressivos assim como as deformações. Tendo como base a Figura 37 a estrutura estaria numa situação de dano moderado a severo.

Tabela 21 - Resumo de resultados do modelo sem grampo vertical, utilizando parâmetros de solo da Tabela 20

$\delta_{hmáx}$ (mm)	$\delta_{vmáx}$ (mm)	δ_{hA} (mm)	δ_{vA} (mm)	δ_{hB} (mm)	δ_{vB} (mm)	L_{AB} (m)	β	ε_h	Possível dano
60	23	56,7	5,6	60	23	3,5	1/199	1/1000	Moderado a severo

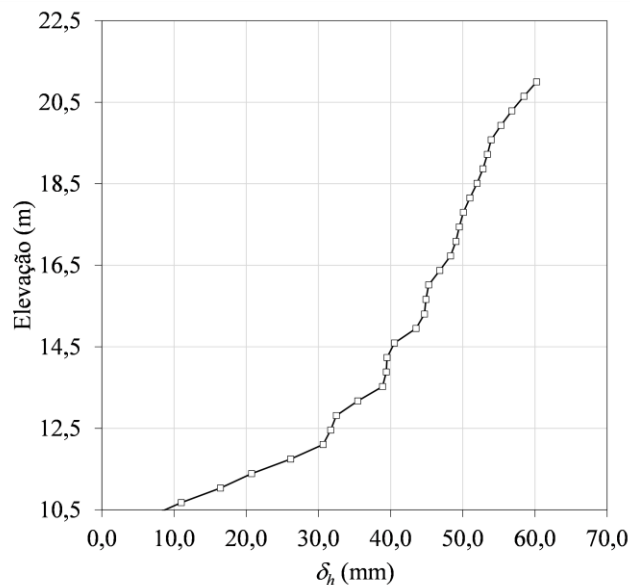


Figura 66 - Deslocamento horizontais sem grampo vertical

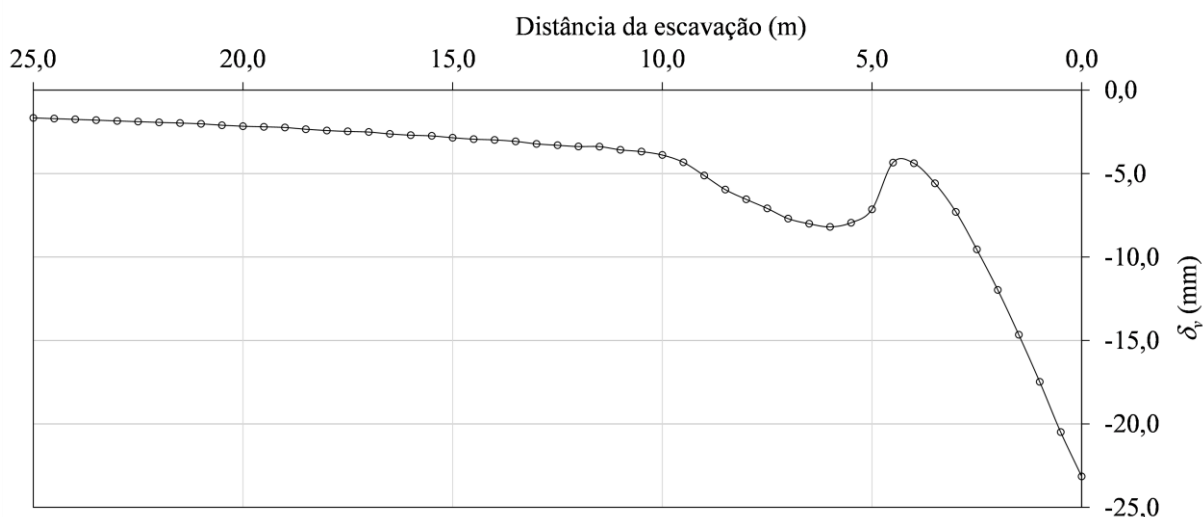


Figura 67 - Deslocamento verticais sem grampo vertical

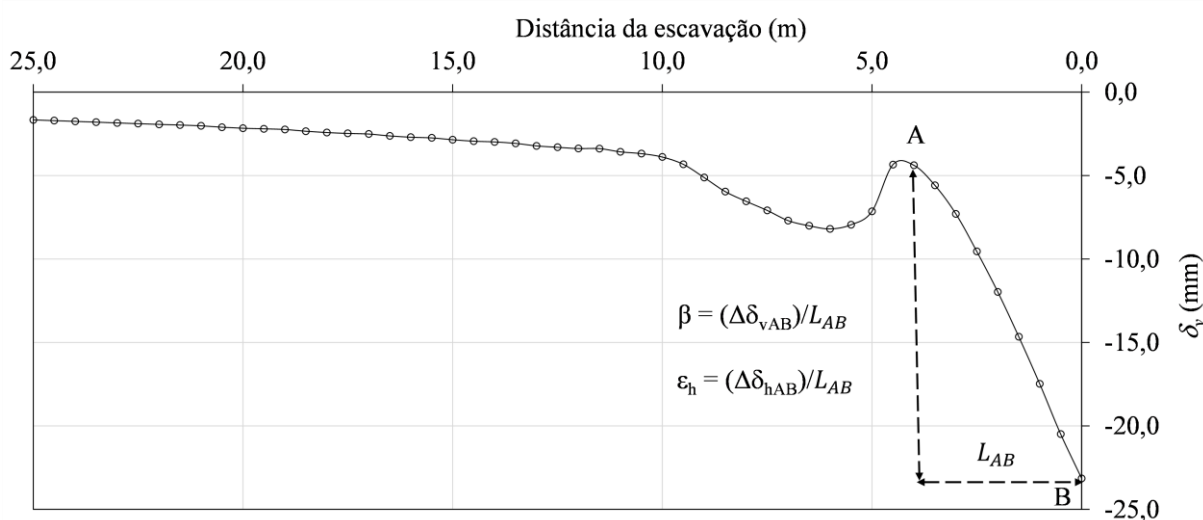


Figura 68 - Detalhe esquemático da obtenção de β e ϵ_h

4.2.3.3 Comprimento GV

4.2.3.3.1 Deslocamentos horizontais

A Figura 69 mostra os resultados da influência da variação do comprimento do grampo vertical (L_v) e diâmetro do GV nos deslocamentos horizontais máximos (δ_{hmax}), que ocorreram no topo da escavação, na última fase de escavação. Vale destacar que os valores de L_v foram normalizados pela altura da escavação (H).

Em relação à L_v , os resultados indicam que com o seu incremento há um aumento também da efetividade do GV em reduzir os δ_{hmax} . Essa diferença é mais notável até uma faixa de $1,28H$, sendo que para valores maiores o aumento da efetividade é considerado pequeno.

No que concerne à influência do diâmetro do *GV*, nota-se uma diferença mais expressiva, sendo que com diâmetros maiores a redução de deslocamento também é maior, demonstrando-se, assim, que a rigidez do reforço é parte importante para que o sistema tenha uma maior efetividade. Por exemplo, enquanto o modelo com 7,5 cm de diâmetro e ficha de 2 m (1,19H) apresentou uma redução de deslocamento de 11,2 mm, o modelo com 15 cm apresentou 18,5 mm, um aumento de 65% na redução dos deslocamentos horizontais.

A Figura 69 a) mostra os resultados da relação entre os deslocamentos horizontais máximos com a altura do paramento, índice muitas vezes utilizado para limites de deslocamentos em solo grampeado, discutido no capítulo 2.5. Nota-se que sem grampo vertical essa relação é da ordem de 0,57%H, enquanto que utilizando grampo vertical houve uma redução com o aumento da ficha, ficando na ordem de 0,40%H, por exemplo, para ficha entre 2 (1,19H) e 3 m (1,28H) e grampo vertical de 15 cm.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de δ_{hmax} os resultados gerais foram 20% (12 mm), 24% (14 mm) e 30% (18 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

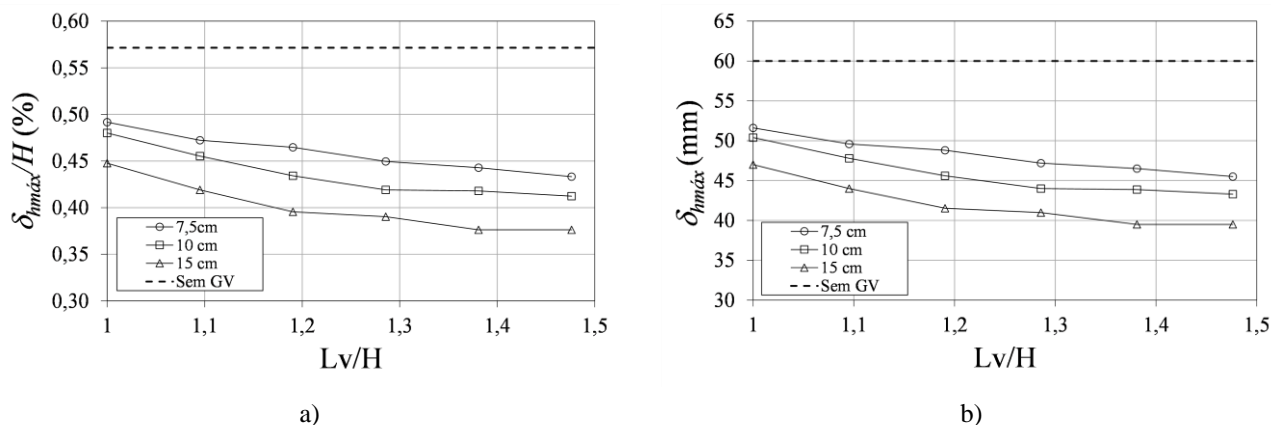


Figura 69 – Influência de L_v/H e diâmetro do *GV* no δ_{hmax}

4.2.3.3.2 Deslocamentos verticais

A Figura 70 mostra os resultados da influência do L_v e diâmetro do *GV* nos deslocamentos verticais máximos (δ_{vmax}) na última fase de escavação. Vale destacar que os valores de L_v foram normalizados pela altura da escavação (H).

Como pode ser observado, assim como ocorreu para os deslocamentos horizontais, com o aumento do L_v , há um aumento também na redução dos deslocamentos verticais. Essa

diferença também foi mais notável até uma faixa de $1,28H$, sendo que para valores maiores o aumento da efetividade é considerado pequeno.

A influência dos diâmetros dos grampos verticais manteve-se substancial, sendo que com diâmetros maiores houve também uma redução maior nos deslocamentos. Adotando a mesma comparação feita para os deslocamentos horizontais, com diâmetro de 7,5 cm e ficha de 2 m ($1,19H$) obteve-se uma redução máxima de 8,60 mm, enquanto que com 15 cm essa redução sobe para 15,5 mm, um incremento de 80%. Esse comportamento foi similar para os demais comprimentos de ficha.

A redução porcentual apresentada na demonstra uma efetividade significativa do grampo vertical, maior que em termos de deslocamentos horizontais. Enquanto que a faixa de redução de deslocamentos horizontais ficou na ordem de 20 a 35%, a faixa de redução de deslocamentos verticais foi da ordem de 28 a 75%, sendo que para diâmetro de 15 cm o mínimo foi de 47%.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de δ_{vmax} os resultados gerais foram 40% (9,2 mm), 49% (11,3 mm) e 65% (15 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm. Comparando-se com os valores obtidos de δ_{vmax} , os resultados indicam que o GV possui uma influência maior na redução de δ_{vmax} .

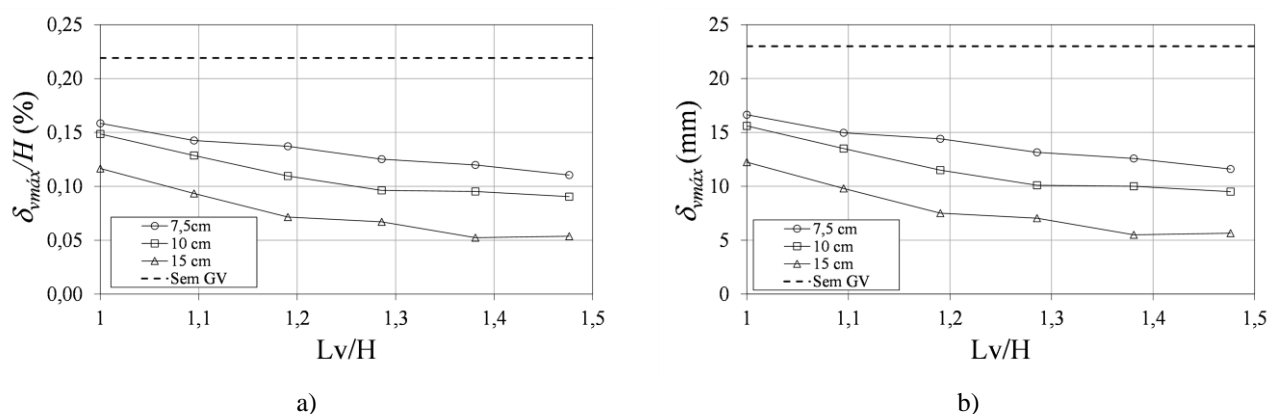


Figura 70 - Influência de Lv/H e diâmetro do GV no δ_{vmax}

4.2.3.3 Danos às estruturas adjacentes

A partir da obtenção da distorção angular e deformação horizontal dos locais mais críticos dos perfis de deslocamento dos modelos, conforme resumido no capítulo 4.2.3.2, a Figura 71 e Tabela 22 mostram sua correlação e os possíveis danos à estrutura adjacente à escavação, seguindo as sugestões de Boscardin e Cording (1989).

Como pode ser analisado, a situação sem grampo vertical recai sobre um grau de dano moderado a severo, próximo, inclusive, de danos severos a muito severos. Já os casos com grampos verticais, já é possível observar um deslocamento dos pontos de correlação para uma condição mais próxima de danos pequenos. A partir da figura, é mais clara a influência maior da redução dos deslocamentos verticais, e conseqüentemente a distorção angular em relação aos deslocamentos horizontais.

A influência do diâmetro e ficha, já relatado nos tópicos anteriores, é evidenciada também nos possíveis danos às estruturas adjacentes, sendo que para maiores diâmetros e maiores comprimentos de ficha os possíveis danos se reduziram.

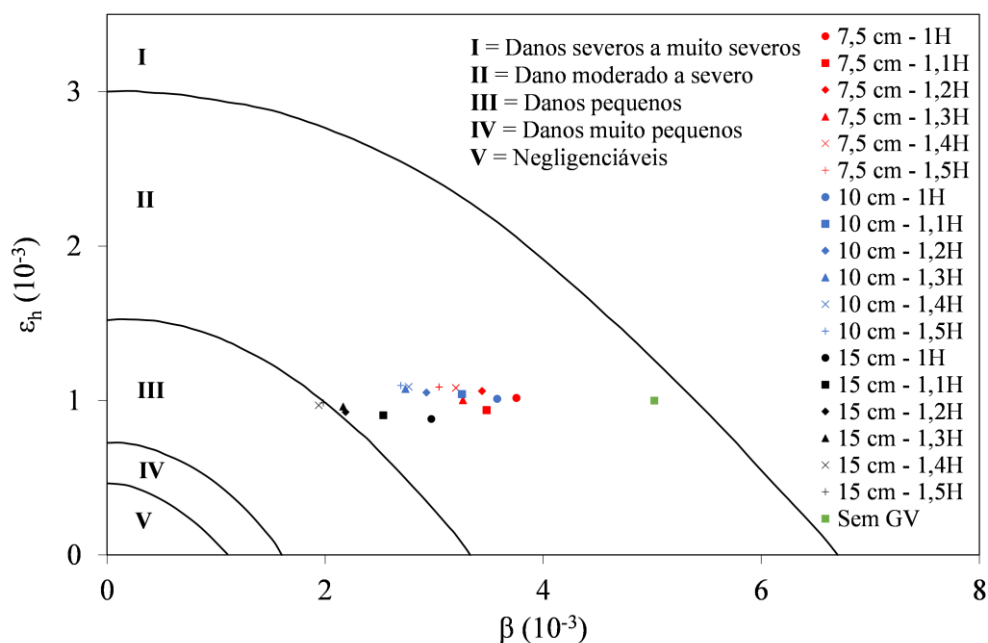


Figura 71 - Análise de danos devido à escavação - GV com diferentes comprimentos de ficha

Tabela 22 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com diferentes comprimentos de GV

Diâmetro (cm)	L _v /H	ϵ_h (10^{-3})	β (10^{-3})
Sem GV	-	1,0	5,0
7,5	1	1,0	3,8
7,5	1,1	0,9	3,5
7,5	1,2	1,1	3,4
7,5	1,3	1,0	3,3
7,5	1,4	1,1	3,2
7,5	1,5	1,1	3,0
10	1	1,0	3,6
10	1,1	1,0	3,3
10	1,2	1,1	2,9

Diâmetro (cm)	L _v /H	ε_h (10 ⁻³)	β (10 ⁻³)
10	1,3	1,1	2,7
10	1,4	1,1	2,8
10	1,5	1,1	2,7
15	1	0,9	3,0
15	1,1	0,9	2,5
15	1,2	0,9	2,2
15	1,3	1,0	2,2
15	1,4	1,0	1,9
15	1,5	1,0	2,0

4.2.3.4 Influência da inclinação

Outro parâmetro do grampo vertical que influencia a escolha final da solução é sua inclinação em relação ao paramento. Muitas vezes a região próxima à instalação da obra possui interferências subterrâneas as quais demandam soluções pontuais geométricas para seu desvio. Nesse sentido, optou-se por elaborar modelos com diferentes inclinações a fim de analisar seu impacto na redução dos deslocamentos finais da estrutura. Para tanto, elaborou-se modelos com grampo vertical com inclinação de 0°; 5°; e 10° em relação ao paramento. Optou-se também por utilizar os três diâmetros já adotados anteriormente de 7,5 cm; 10 cm; e 15 cm.

A partir do estudo anterior de comprimento de ficha do grampo vertical, optou-se por adotar nessa análise um comprimento de 2 m de ficha, totalizando 12,50 m (1,19H). Assim, a inclinação de 0° e comprimento de 2 m de ficha já foi estudada no tópico anterior, sendo que neste tópico as análises serão complementadas com as inclinações de 5° e 10°.

4.2.3.4.1 Deslocamentos horizontais

A Figura 72 mostra os resultados da influência da inclinação do *GV* no $\delta_{h_{max}}$, que ocorreram no topo da escavação, na última fase de escavação.

A partir dos resultados percebe-se que a inclinação teve um papel expressivo na redução de $\delta_{h_{max}}$. Com o aumento da inclinação houve uma diminuição na redução de $\delta_{h_{max}}$. Enquanto que com *GV*, sem inclinação e diâmetro de 15 cm a redução foi da ordem de 18 mm, com 5° houve uma redução na eficiência de 50%, totalizando 9 mm aproximadamente, e com 10° uma redução de eficiência de 80%, totalizando 3 mm aproximadamente. Para os demais diâmetros de 7,5 cm e 10 cm o comportamento foi similar.

Nota-se que a influência do diâmetro do *GV* diminui com o aumento da inclinação, segundo os resultados. Ou seja, com maiores inclinações não há uma diferença tão significativa, no que tange à redução de deslocamentos, adotando diâmetros maiores. Isso provavelmente se deve ao enrijecimento local da face do paramento que o *GV* propicia, portanto, quanto mais afastado da face menor sua efetividade. O possível efeito de ancoragem do *GV* no maciço com a adoção de inclinação, se comportando como um cavalete, não foi observado nos resultados dos modelos, pois o *GV* se deformou em conjunto com o paramento.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de δ_{hmax} os resultados gerais foram 12% (7 mm), 14% (8 mm) e 17% (10 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

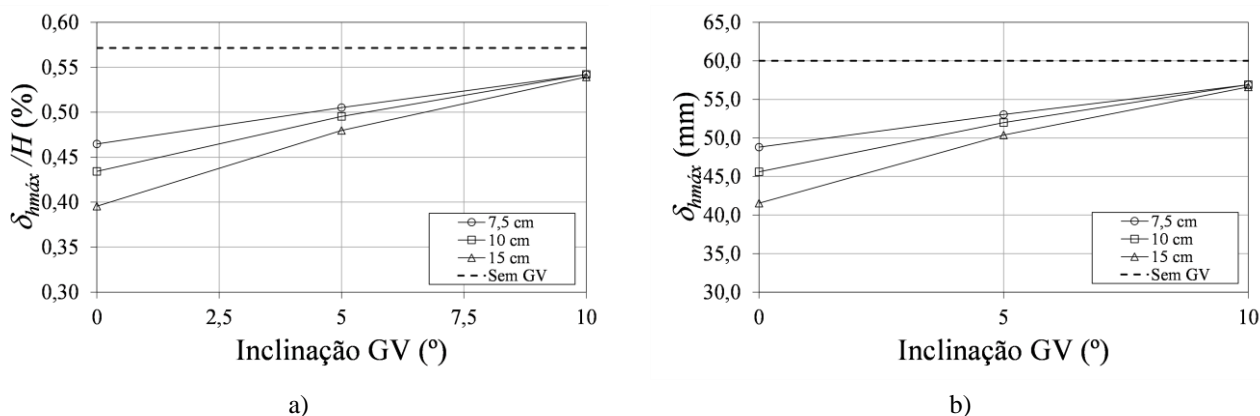


Figura 72 - Influência da inclinação do *GV* e diâmetro do *GV* no δ_{hmax}

4.2.3.4.2 Deslocamentos verticais

A Figura 73 mostra os resultados da influência da inclinação do *GV* no δ_{vmax} , que ocorreram no topo da escavação, na última fase de escavação.

Percebe-se que o mesmo comportamento obtido nos resultados de redução de deslocamento horizontal é refletido também na redução dos deslocamentos verticais. Ou seja, com o aumento da inclinação há também uma diminuição da redução dos deslocamentos verticais.

Apesar da redução expressiva em termos de redução de deslocamentos, com inclinação de 5° houve ainda uma redução entre 22 e 34% dos deslocamentos em relação à condição sem grampo vertical. Contudo, essa porcentagem representa deslocamentos absolutos entre 5 e 7,8 mm, que dependendo da obra não são valores tão representativos.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de δ_{vmax} os resultados gerais foram 23% (5,3 mm), 29% (6,7 mm) e 38% (8,7 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

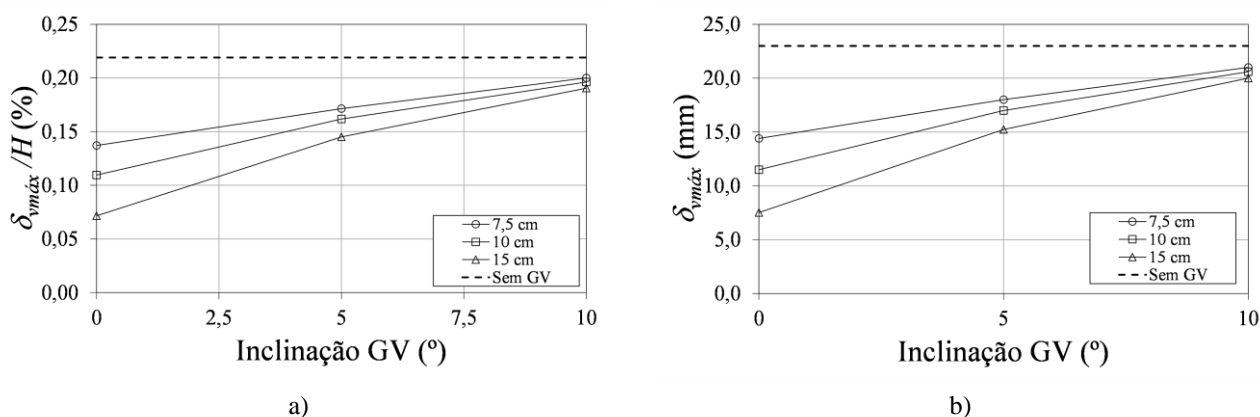


Figura 73 - Influência da inclinação do GV e diâmetro do GV no δ_{vmax}

4.2.3.4.3 Danos às estruturas adjacentes

A Figura 74 mostra os resultados de possíveis danos às estruturas adjacentes à escavação a partir da distorção angular e deformação horizontal obtidos dos resultados dos modelos numéricos com grampos verticais com diferentes inclinações.

Como era esperado, a influência da inclinação descrita nos tópicos anteriores se reflete nos possíveis danos às estruturas adjacentes. Nota-se que com a diminuição da inclinação do grampo vertical em relação ao paramento há também uma diminuição dos possíveis danos às estruturas adjacentes à escavação. A influência do diâmetro também foi maior para os casos com grampo vertical sem inclinação.

Ademais, notou-se que para os casos com inclinação de 5° e 10° houve um pequeno aumento de ϵ_h em relação à condição sem grampo vertical, algo que não era esperado. Isso se atribui ao fato que os locais onde estão sendo retirados os valores para o cálculo de ϵ_h encontram-se na superfície do modelo. No entanto, observando os resultados ao longo da profundidade, percebe-se que há uma redução de ϵ_h em comparação à condição sem grampo vertical.

Para exemplificar a questão, a Tabela 24 resume os deslocamentos horizontais e ϵ_h para o caso com grampo vertical de 10 cm e inclinação de 10°. Esses valores foram retirados da face da escavação e a 3,50 m atrás da face. Escolheu-se o ponto a 3,50 m de distância da face por conta do perfil de deslocamentos ilustrados na Figura 75. Nota-se que somente até a

profundidade de 1,10 m (elevação 19,9 m) o ε_h da condição com grampo vertical é maior que a condição sem grampo vertical, porém, abaixo disso todos os valores são menores. Nesse sentido, apesar dos valores pontuais de aumento de ε_h na superfície, em geral o comportamento do modelo com reforço tem uma diminuição de ε_h . De qualquer forma, considera-se que esse aumento é desprezível, sendo, então, ainda válida a análise somente pelos valores da superfície.

Com base nos resultados numéricos nota-se, então, que a posição relativa do grampo vertical em relação ao paramento é importante para uma maior eficiência na redução dos deslocamentos, tendendo ser maior a efetividade de grampos sem inclinação.

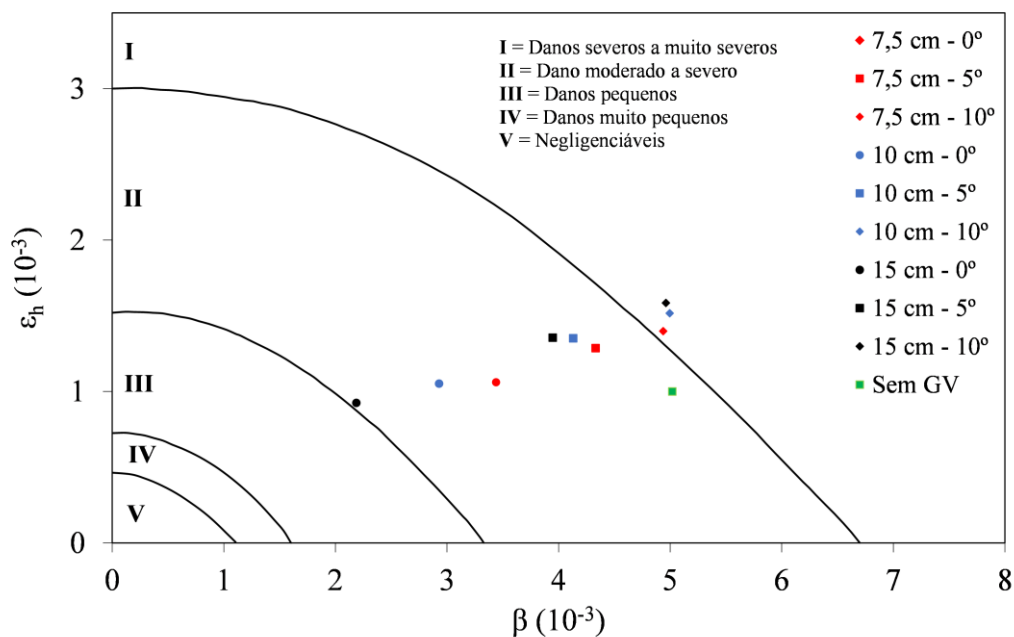


Figura 74 - Análise de danos devido à escavação - GV com diferentes inclinações

Tabela 23 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com diferentes inclinações de GV

Diâmetro (cm)	Inclinação (°)	ε_h (10 ⁻³)	β (10 ⁻³)
Sem GV	-	1,0	5
7,5	0	1,1	3,4
7,5	5	1,3	4,3
7,5	10	1,4	4,9
10	0	1,1	2,9
10	5	1,4	4,1
10	10	1,5	5,0
15	0	0,9	2,2
15	5	1,4	3,9
15	10	1,6	5,0

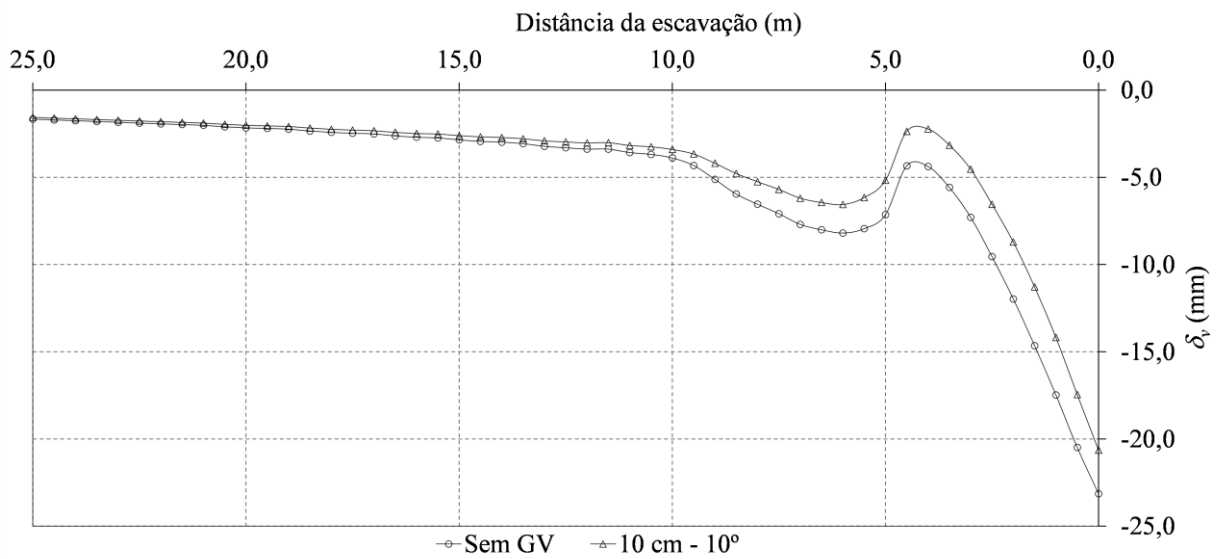


Figura 75 - Perfil de deslocamento vertical sem grampo vertical e com grampo vertical de 10 cm e 10° de inclinação

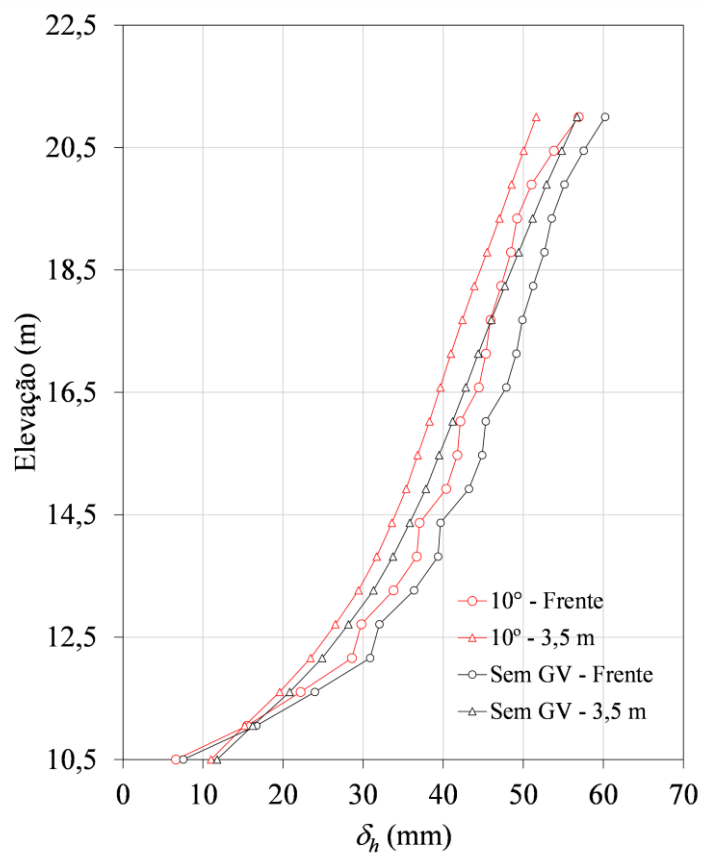


Figura 76 - Perfil de deslocamentos horizontais sem grampo vertical e com grampo vertical de 10 cm e 10° de inclinação

Tabela 24 - Resultado de deformação horizontal para o caso com grampo vertical de 10 cm com 10° de inclinação

Elevação (m)	GV 10 cm – 10°			Sem GV		
	δ_h - Frente (mm)	δ_h - 3,50 m (mm)	ϵ_h (10 ⁻³)	δ_h - Frente (mm)	δ_h - 3,50 m (mm)	ϵ_h (10 ⁻³)
21,0	56,9	51,6	1,5	60,2	56,7	1,0
20,4	53,8	50,1	1,1	57,5	54,8	0,8
19,9	51,0	48,5	0,7	55,1	52,9	0,6
19,3	49,2	47,0	0,6	53,5	51,2	0,7
18,8	48,5	45,5	0,9	52,6	49,4	0,9
18,2	47,2	43,9	1,0	51,2	47,7	1,0
17,7	45,9	42,4	1,0	49,9	46,0	1,1
17,1	45,3	41,0	1,2	49,1	44,4	1,4
16,6	44,4	39,6	1,4	47,9	42,8	1,4
16,0	42,1	38,3	1,1	45,3	41,2	1,2
15,5	41,8	36,8	1,4	44,9	39,5	1,5
14,9	40,4	35,4	1,4	43,2	37,8	1,5
14,4	37,1	33,6	1,0	39,7	35,8	1,1
13,8	36,7	31,7	1,4	39,3	33,7	1,6
13,3	33,8	29,4	1,2	36,3	31,3	1,4
12,7	29,8	26,5	0,9	32,0	28,2	1,1
12,2	28,6	23,4	1,5	30,9	24,9	1,7
11,6	22,2	19,6	0,7	24,0	20,8	0,9
11,1	15,5	15,2	0,1	16,6	16,2	0,1
		Média	1,06		Média	1,11

4.2.3.5 Influência da quantidade de linhas de GV

Após a análise da influência da ficha do grampo vertical (GV) e inclinação em relação ao paramento, nesse tópico serão apresentados os resultados de redução de deslocamentos horizontais, verticais e danos às estruturas adjacentes considerando mais de uma linha de GV.

Para tanto, foram considerados modelos com 2 e 3 linhas de grampos verticais, conforme as figuras 77 e 78 ilustram. Com base nos resultados anteriores, considerou-se $L_v = 12,50$ m (1,19H) e grampos sem inclinação. Destaca-se que a primeira linha, como estava sendo considerado nos modelos anteriores, encontra-se a 20 cm da face, enquanto as demais linhas tiveram um espaçamento de 50 cm entre elas.

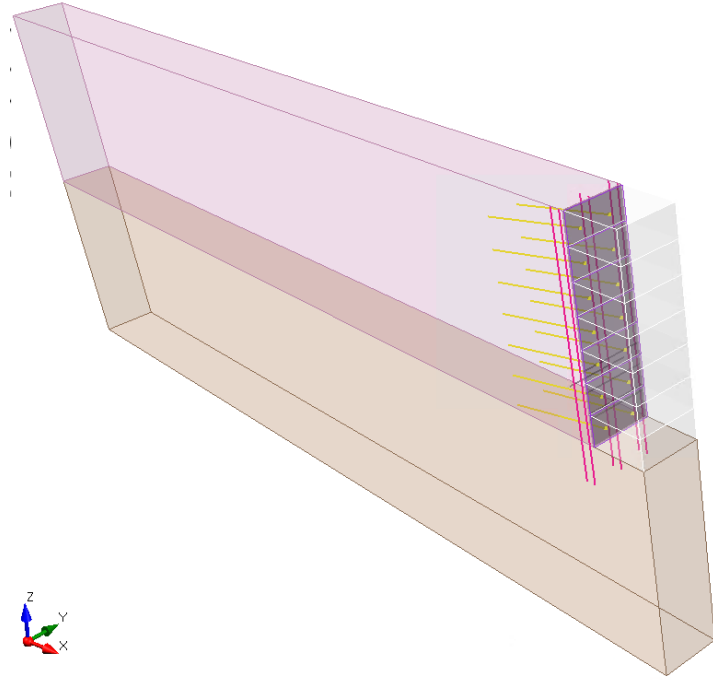


Figura 77 - Modelo com duas linhas de grampos verticais

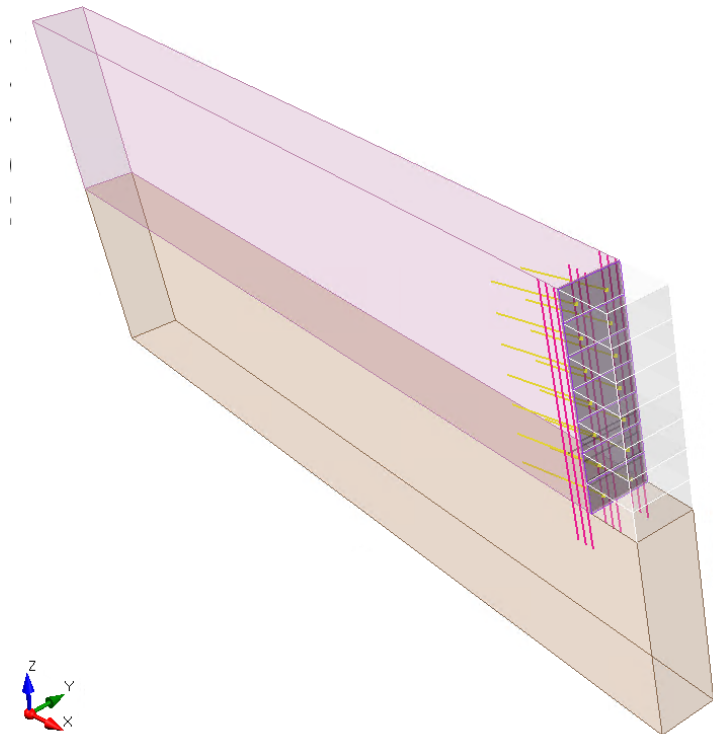


Figura 78 - Modelo com três linhas de grampos verticais

4.2.3.5.1 Deslocamentos horizontais

A Figura 79 mostra os resultados da influência da quantidade de linhas e diâmetro do *GV* no $\delta_{hmáx}$, que ocorreram no topo da escavação, na última fase de escavação.

Primeiramente, nota-se que com a inserção de novas linhas de *GV* há uma diminuição no $\delta_{hmáx}$ para a última fase de escavação, contudo, pouco expressivo em termos de valores de engenharia. No caso de *GV* de 10 cm, por exemplo, de uma linha para duas linhas houve um aumento na redução dos deslocamentos de somente 4,5 mm, considerado pouco expressivo. Nos demais casos esse comportamento se manteve similar. Verifica-se que de duas para três linhas de grampos praticamente não houve alteração na redução de deslocamentos. Essa ordem de grandeza de redução também foi obtida por Souza (2019) em seus modelos numéricos considerando mais de uma linha de grampos verticais.

Em relação ao diâmetro, sua influência continua sendo constatada, sendo que para maiores diâmetros a uma maior redução de deslocamentos. Nota-se também que com o aumento do diâmetro a inclusão de novas linhas de grampos verticais se torna menos efetiva na redução dos deslocamentos. Por exemplo, com grampos verticais de 7,5 cm com a inclusão de duas linhas de grampos houve um aumento na redução de deslocamentos horizontais de 11,2 mm para 15,2 mm, um aumento de 36% em relação à condição com somente uma linha. Já para o caso de 15 cm esse aumento foi de 2,94 mm, totalizando 16%.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de δ_{hmax} os resultados gerais foram 24% (14 mm), 29% (17 mm) e 34% (20 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

Apesar dos resultados, chamou a atenção a pouca efetividade da adição de novas linhas de grampos verticais na redução dos deslocamentos horizontais. Uma hipótese dessa pouca efetividade recai sobre o tipo de modelagem adotada na presente pesquisa que considera o grampo vertical como um elemento de viga, sendo, assim, um elemento estrutural. Contudo, deve se lembrar que durante sua execução poderão ser aplicadas injeções pressurizadas para tratamento do solo circundante, tendo, então, um enrijecimento local do maciço. Esse efeito muito provavelmente se intensifica com adição de novas linhas de grampos verticais. No entanto, esse tipo de efeito não será considerado na presente pesquisa.

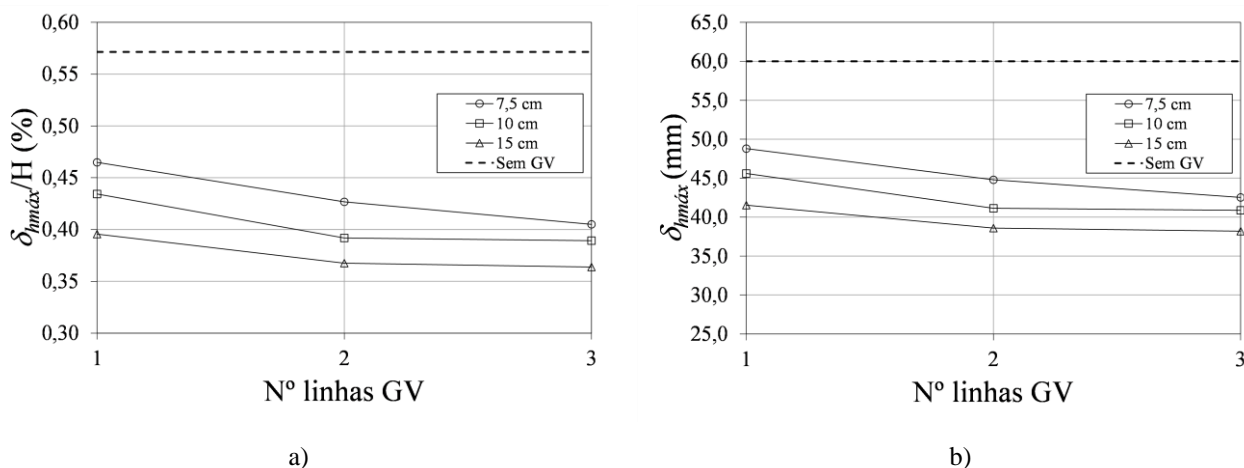


Figura 79 - Influência da quantidade de linhas e diâmetro do GV no $\delta_{hm\acute{a}x}$

4.2.3.5.2 Deslocamentos verticais

Os resultados de redução nos deslocamentos verticais estão apresentados na Figura 80.

Segundo os resultados, a maior efetividade da adição de novas linhas de GV se deu na redução do $\delta_{vm\acute{a}x}$. Isso também se deve ao fato que esse valor é mais sensível em comparação com $\delta_{hm\acute{a}x}$. Assim como para $\delta_{hm\acute{a}x}$, com o aumento do número de linhas de GV há também uma maior efetividade da redução de $\delta_{vm\acute{a}x}$. O maior aumento se deu na adição da segunda linha de grampo em comparação com o caso da primeira, apresentado uma diferença de 4,0 mm aproximadamente com os diferentes diâmetros adotados. Comparando o resultado de duas e três linhas não houve um aumento tão expressivo na redução dos deslocamentos.

Mesmo que os valores ainda sejam pequenos de redução absoluta, em termos percentuais observa-se valores mais expressivos, variando entre 57 e 84% para os modelos com duas linhas de grampos verticais e 67 e 91% para os casos com três linhas de grampos verticais.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de $\delta_{v\max}$ os resultados gerais foram 54% (12,4 mm), 65% (15 mm) e 81% (18,6 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

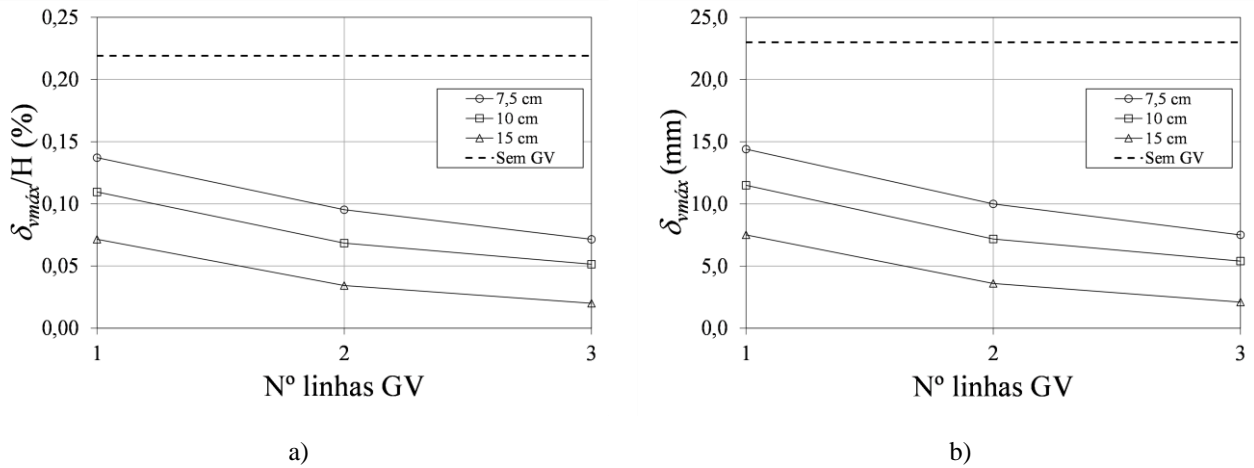


Figura 80 - Influência da quantidade de linhas e diâmetro do GV no $\delta_{vmáx}$

4.2.3.5.3 Danos às estruturas adjacentes

A Figura 81 ilustra os resultados de deformação horizontal e distorção angular a luz dos possíveis danos às estruturas adjacentes à escavação.

Como era esperado, o maior efeito da adição de novas linhas de grampos verticais em termos de possíveis danos às estruturas adjacentes se deu pela maior redução na distorção angular. Em relação à deformação horizontal, observa-se um pequeno aumento com a adição de novas linhas de grampo, porém, pela mesma questão analisada no tópico anterior sobre a análise da inclinação dos grampos e, assim, considerada desprezível.

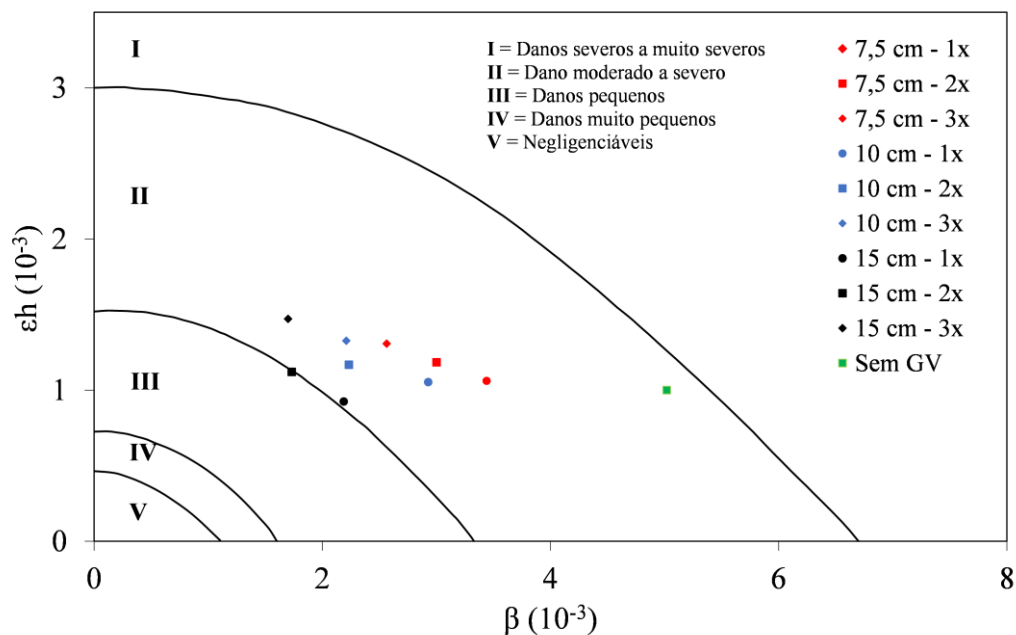


Figura 81 - Análise de danos devido à escavação – diferentes linhas de GV

Tabela 25 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com diferentes linhas de GV

Diâmetro	Qtd. de linhas de GV	ϵ_h (10 ⁻³)	β (10 ⁻³)
Sem GV	-	1,0	5,0
7,5	1	1,1	3,4
7,5	2	1,2	3,0
7,5	3	1,3	2,6
10	1	1,1	2,9
10	2	1,2	2,2
10	3	1,3	2,2
15	1	0,9	2,2
15	2	1,1	1,7
15	3	1,5	1,7

4.2.3.6 Influência do comprimento do grampo sub-horizontal

Até o momento foram analisados diferentes cenários de grampos verticais e sua efetividade na redução de deslocamentos. No entanto, caso o intuito da adição do grampo vertical seja diminuir deslocamentos e possíveis danos às estruturas adjacentes é necessário analisar a estrutura do solo grampeado como um todo, considerando, então, o efeito do grampo sub-horizontal também.

Todos os modelos até o momento tinham como premissa somente a mudança dos parâmetros de grampo vertical, mantendo o grampo sub-horizontal com 6 m de comprimento, conforme o modelo de referência de Gerscovich *et al.* (2005). Porém, sabe-se que com o aumento do grampo sub-horizontal é também constatada a redução de deslocamentos. Nesse sentido, foram elaborados modelos com diferentes comprimentos de grampos sub-horizontais: 6 m; 7 m; 8 m; e 9 m. No que se refere ao grampo vertical, com base nos resultados anteriores, adotou-se uma linha de grampo de 15 cm de diâmetro com 12,50 m (1,19H), e sem inclinação para todos os modelos.

4.2.3.6.1 Deslocamentos horizontais

A Figura 82 ilustra os resultados obtidos de $\delta_{hmáx}$ para a última fase de escavação considerando GV e diferentes comprimentos de grampos sub-horizontais. Vale pontuar que os comprimentos dos grampos sub-horizontais (Lh) foram normalizados de acordo com o tamanho do paramento (H). Assim, os comprimentos de grampos sub-horizontais de 6, 7, 8 e 9 m têm como valores normalizados, respectivamente, 0,57H; 0,67H; 0,76H; e 0,86H.

A partir dos resultados, nota-se uma influência significativa do Lh na efetividade do GV na redução de deslocamentos horizontais em termos absolutos. Com o aumento de Lh há uma diminuição na efetividade do grampo vertical na redução dos deslocamentos absolutos. Por exemplo, para o caso de grampo vertical com 15 cm e Lh de 6 m a redução foi da ordem de 18,47 mm, somente devido à adição do grampo vertical. Enquanto que para Lh com 9 m esse valor se reduz para 10,6 mm. Para os demais diâmetros de grampo vertical o comportamento foi similar.

No entanto, considerando os valores de redução de $\delta_{hmáx}$ devido ao GV em termos percentuais, não houve uma alteração tão significativa com o aumento de Lh . Para o caso de GV com 15 cm e Lh de 6 m houve uma redução da ordem de 30%, enquanto que para Lh de 9 m esse valor se reduz para 23,5% aproximadamente. Para GV de 10 cm esses valores extremos são da ordem de 24 e 18%. Já para GV de 7,5 cm os mesmos valores variaram entre 18,7 e 15,5%.

As análises realizadas demonstram a efetividade conjunta do GV com GH . Por exemplo, para o caso com Lh de 9 m sem grampo vertical obteve-se uma relação $\delta_{hmáx}/H$ da ordem de 0,43%, enquanto que considerando o grampo vertical isso se reduz para 0,33%. Para os demais modelos o comportamento foi similar.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de δ_{hmax} os resultados gerais foram 17% (9 mm), 21% (11 mm) e 27% (14 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

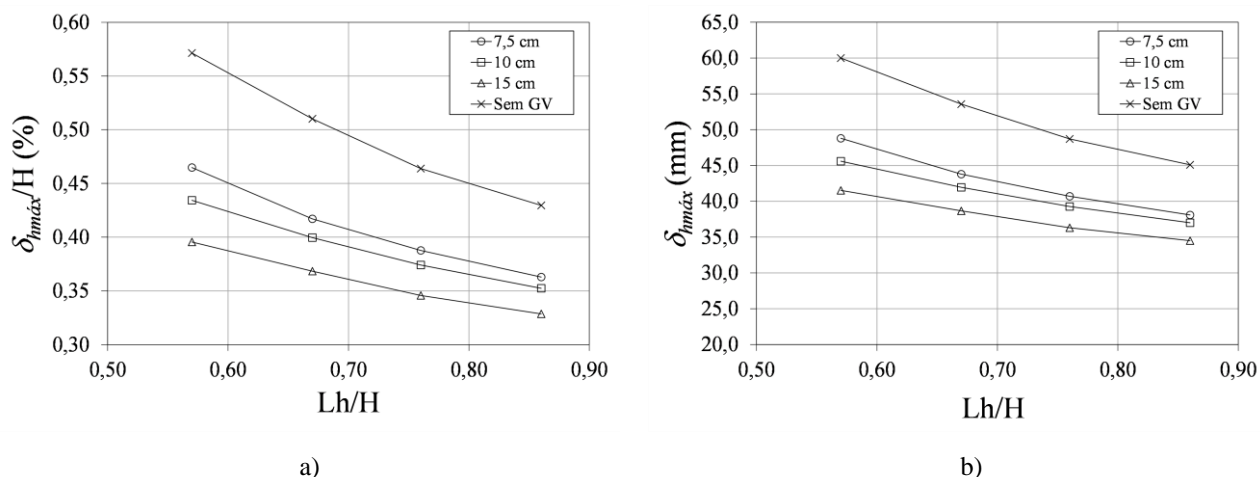


Figura 82 - Influência de Lh/H e diâmetro do GV no $\delta_{hm\acute{a}x}$

4.2.3.6.2 Deslocamentos verticais

A Figura 83 ilustra o resultado de deslocamentos verticais. Ao contrário do observado nos deslocamentos horizontais, não houve uma alteração tão significativa na efetividade do GV no que se refere à redução de deslocamentos verticais em termos absolutos, mesmo aumentando Lh . Como pode ser observado na redução dos deslocamentos absolutos, no caso de GV com 15 cm e Lh de 6 m, a redução foi da ordem de 15,5 mm, enquanto que para Lh de 9 m isso se reduziu para 13,2 mm, diferença pouco significativa, se tratando, principalmente de modelagem numérica. Essa diferença pouco expressiva foi observada também para os demais diâmetros de GV .

Nesse sentido, a redução percentual de deslocamentos verticais devido à introdução do grampo vertical manteve-se alta, independentemente do aumento de Lh . Para o caso de GV com 15 cm a média de redução foi de aproximadamente 67%, para 10 cm 49%, e para 7,5 cm 40%.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de $\delta_{v\max}$ os resultados gerais foram 40% (8 mm), 49% (10 mm) e 67% (14 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

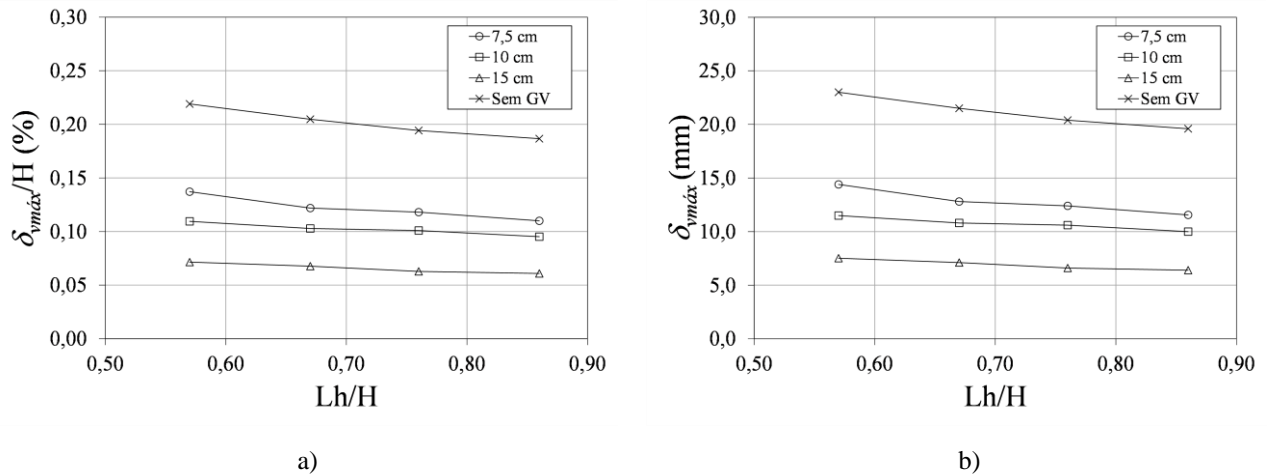


Figura 83 - Influência de Lh/H e diâmetro do GV no δ_{vmax}

4.2.3.6.3 Danos às estruturas adjacentes

A Figura 84 e Tabela 26 ilustram os resultados de deformação horizontal e distorção angular a luz dos possíveis danos às estruturas adjacentes à escavação.

Como já era esperado, o efeito global da redução de possíveis danos, ou seja, alinhado tanto a redução de deformação horizontal quanto distorção angular, se deu pela consideração de grampo vertical de 15 cm e grampo sub-horizontal de 9 m (0,86H). Isso corrobora com a questão que para uma devia redução de deslocamentos e redução de danos às estruturas adjacentes é necessário analisar a configuração ótima dos dois elementos em conjunto. Ou seja, cada um terá seu papel na redução de deslocamentos.

Ademais, com bases nos resultados, indica-se que possivelmente o efeito do grampo vertical é mais evidente para deslocamentos verticais em vez de deslocamentos horizontais, mesmo que ele tenha também um efeito nesse último.

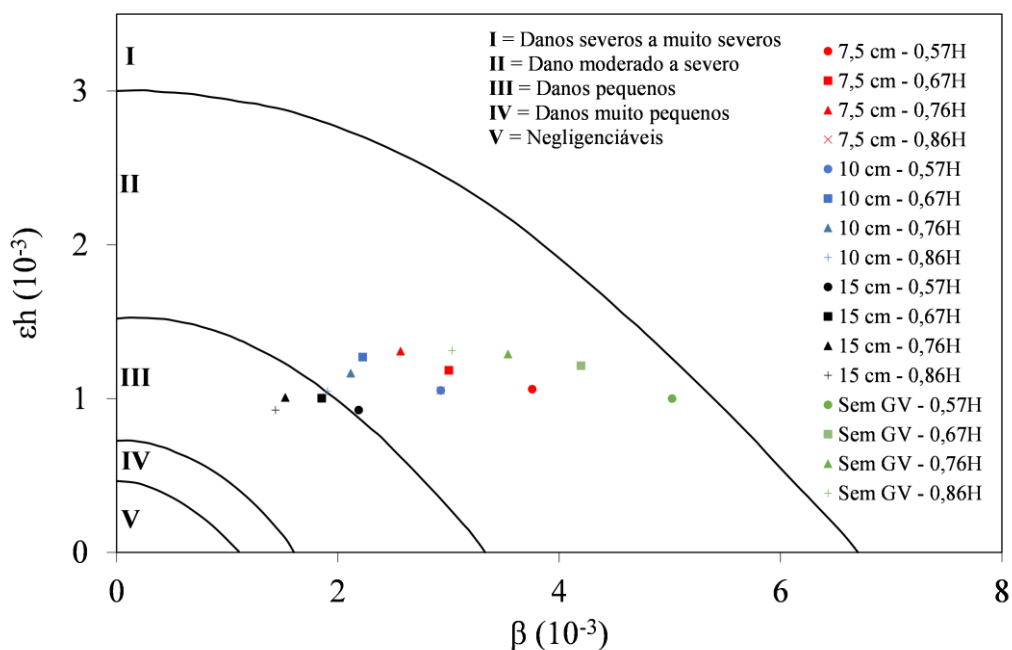


Figura 84 - Análise de danos devido à escavação – diferentes comprimentos de grampos sub-horizontais (Lh)

Tabela 26 - Distorção angular e deformação horizontal das análises com grampo vertical e diferentes comprimentos de Lh

Diâmetro (cm)	Lh/H	ϵh (10^{-3})	β (10^{-3})
Sem GV	0,57	1,0	5,0
Sem GV	0,67	1,2	4,2
Sem GV	0,76	1,3	3,5
Sem GV	0,86	1,3	3,0
7,5	0,57	1,1	3,4
7,5	0,67	1,3	2,5
7,5	0,76	1,2	2,4
7,5	0,86	1,1	2,0
10	0,57	1,1	2,9
10	0,67	1,3	2,2
10	0,76	1,2	2,1
10	0,86	1,0	1,9
15	0,57	0,9	2,2
15	0,67	1,0	1,9
15	0,76	1,0	1,5
15	0,86	0,9	1,4

4.2.3.7 Influência espaçamento horizontal do grampo vertical

A última análise paramétrica proposta pelo presente estudo se refere à análise da influência do espaçamento horizontal do *GV*. Até o momento em todos os modelos que utilizaram *GV* adotou-se como espaçamento horizontal entre os *GVs* o valor de 1,50 m. No entanto, pensando em uma possível otimização da solução, optou-se por elaborar modelos com espaçamento horizontal do *GV* de 3,0 m também e analisar o impacto nos deslocamentos. Ou seja, levando em consideração que o grampo horizontal (*GH*) é espaçado horizontalmente em 1,50 m, nessas novas análises os *GVs* ficariam alternados em relação ao grampo sub-horizontal. A Figura 85 ilustra os modelos adotados.

Tendo como base as análises realizadas até o momento, optou-se por utilizar grampos verticais de 15 cm com 12,50 m e sem inclinação. Ademais, para os *GHs* optou-se por adotar 8,0 m de comprimento ($L_h/H = 0,76$), situação que apresentou uma redução de deslocamentos mais significativa em relação à configuração com 6,0 m padrão.

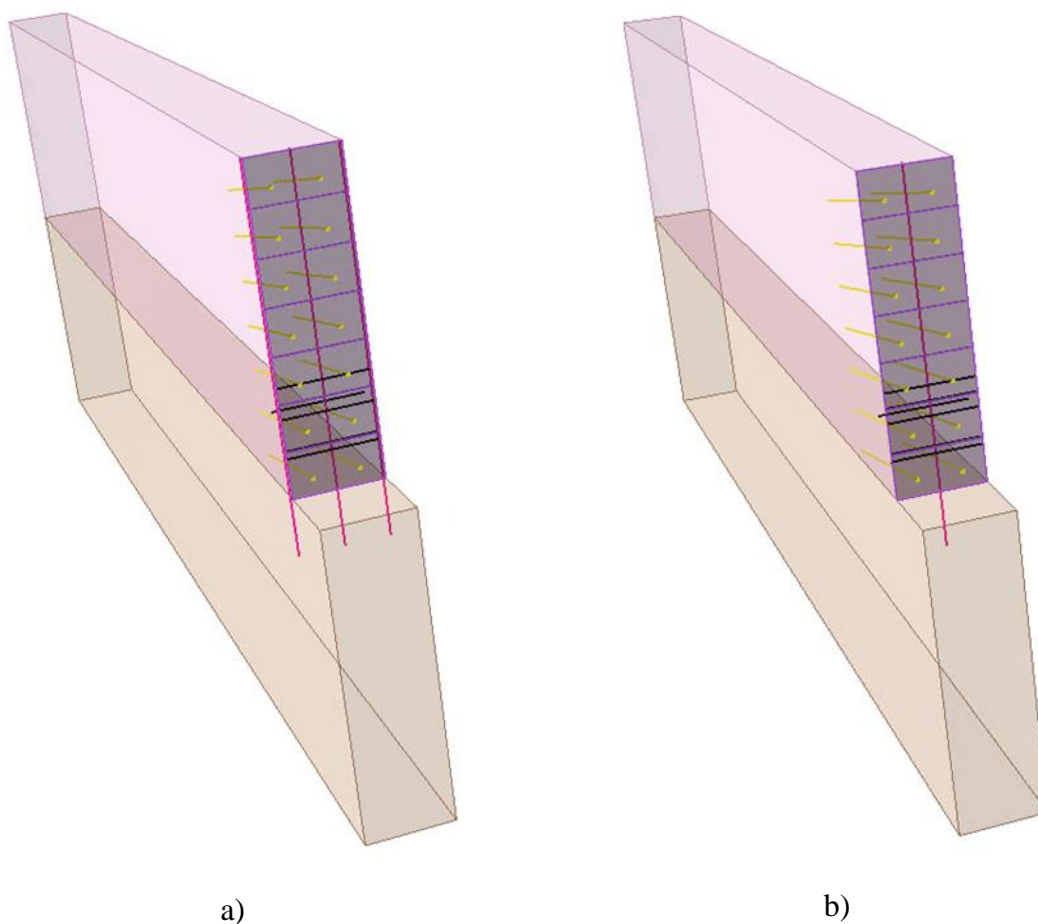


Figura 85 - Modelo com espaçamento horizontal entre GV com 1,5m (a) e 3,0m (b)

4.2.3.7.1 Deslocamentos horizontais

A Figura 86 ilustra os resultados obtidos de redução de deslocamentos horizontais com 1,50 e 3,0 m de espaçamentos horizontais entre os grampos verticais, bem como com diferentes diâmetros.

Como era esperado, com o aumento do espaçamento horizontal dos *GVs* há uma diminuição na eficiência em reduzir os deslocamentos horizontais. Enquanto que com 1,50 m de espaçamento horizontal e diâmetro de 15 cm a redução foi da ordem de 12,4 mm, com espaçamento de 3,0 m isso se reduz para 8,4 mm, uma diminuição de aproximadamente 30%. Para os demais diâmetros esse comportamento foi similar. Isso se reflete também nas reduções em termos percentuais e conseqüentemente na relação entre deslocamento horizontal máximo ($\delta_{h\max}$) e a altura do paramento.

Essa diminuição de eficiência se atribui ao fato da diminuição geral da rigidez da estrutura em virtude da menor quantidade de grampos verticais adotando um espaçamento horizontal de 3,0 m. Em contrapartida, dependendo da sensibilidade das estruturas adjacentes e o nível de deslocamento permitido, ainda com um espaçamento maior entre os grampos verticais a redução de deslocamento pode ser justificável por conta do ganho financeiro. Entretanto, isso depende de caso a caso e não cabe a esse estudo entrar em mais detalhe sobre essa questão.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de $\delta_{h\max}$ os resultados gerais foram 14% (8,4 mm), 17% (10,2 mm) e 21% (12,6 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

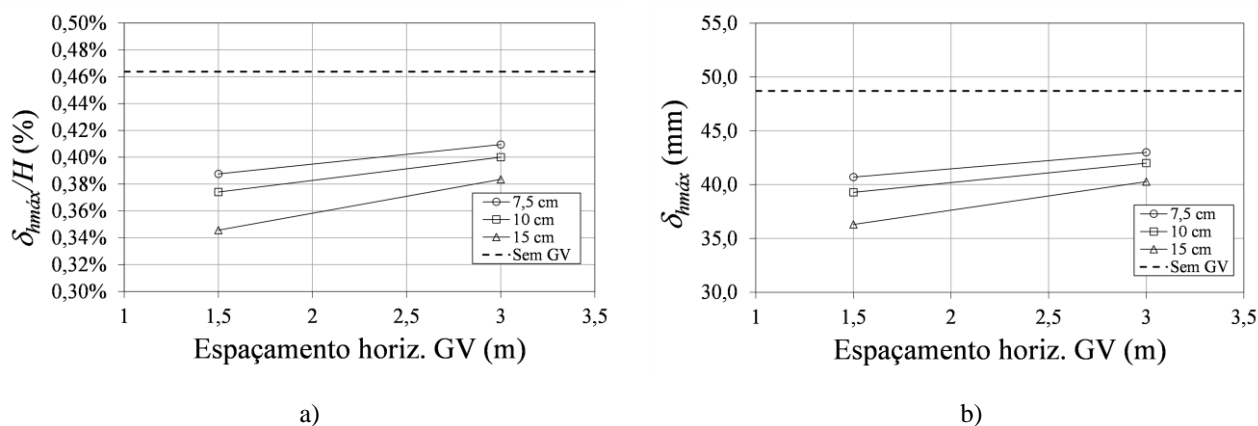


Figura 86 - Influência de espaçamento horizontal e diâmetro do GV no $\delta_{h\max}$

4.2.3.7.2 Deslocamentos verticais

A Figura 87 ilustra os resultados obtidos de redução de deslocamentos verticais com 1,50 e 3,0 m de espaçamentos horizontais entre os grampos verticais, bem como com diferentes diâmetros.

Assim como para os deslocamentos horizontais, observa-se também que com o aumento do espaçamento horizontal dos grampos verticais, a eficiência dos grampos verticais na redução dos deslocamentos verticais diminui. De qualquer forma, em termos de redução porcentual os valores se mantiveram relativamente altos levando em consideração diâmetro de 10 e 15 cm, que variaram entre 31 e 41% de redução em relação ao caso sem grampo vertical, mesmo com 3,0 m de espaçamento.

Em relação à média de reduções percentuais e absolutas de $\delta_{v\max}$ os resultados gerais foram 33% (7,6 mm), 40% (9,2 mm) e 54% (12,4 mm), correspondendo, respectivamente aos diâmetros de 7,5 cm, 10 cm e 15 cm.

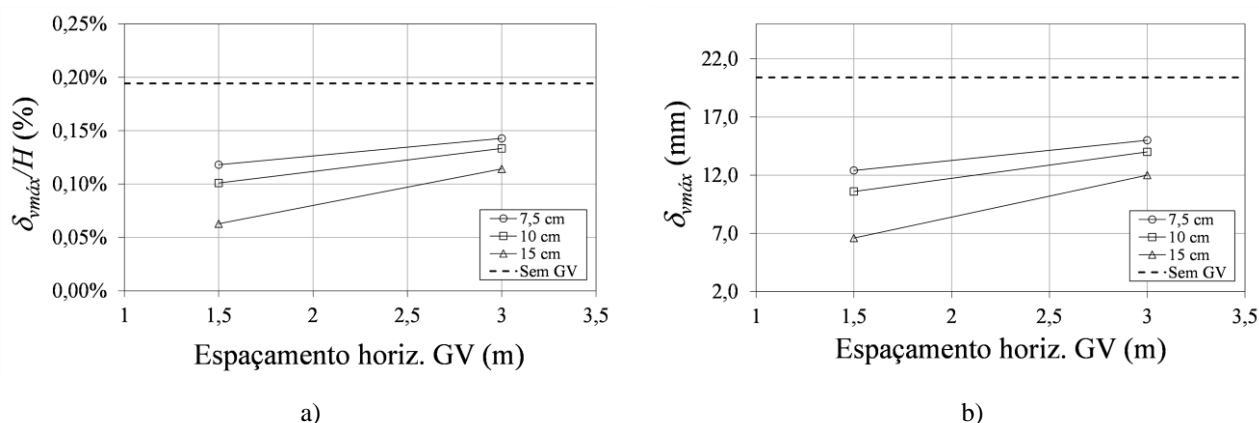


Figura 87 - Influência de espaçamento horizontal e diâmetro do GV no v_{\max}

4.2.3.7.3 Danos às estruturas adjacentes

A Figura 88 e Tabela 27 ilustram os resultados de deformação horizontal e distorção angular a luz dos possíveis danos às estruturas adjacentes à escavação.

Como era esperado, a condição mais favorável para um dano teórico menor nas estruturas adjacentes é aquela onde adotou-se grampo vertical com 15 cm e espaçamento horizontal de 1,50 m. No entanto, observa-se que em todos os casos, mesmo para aqueles com 3,0 m de espaçamento horizontal, houve uma diminuição dos possíveis danos.

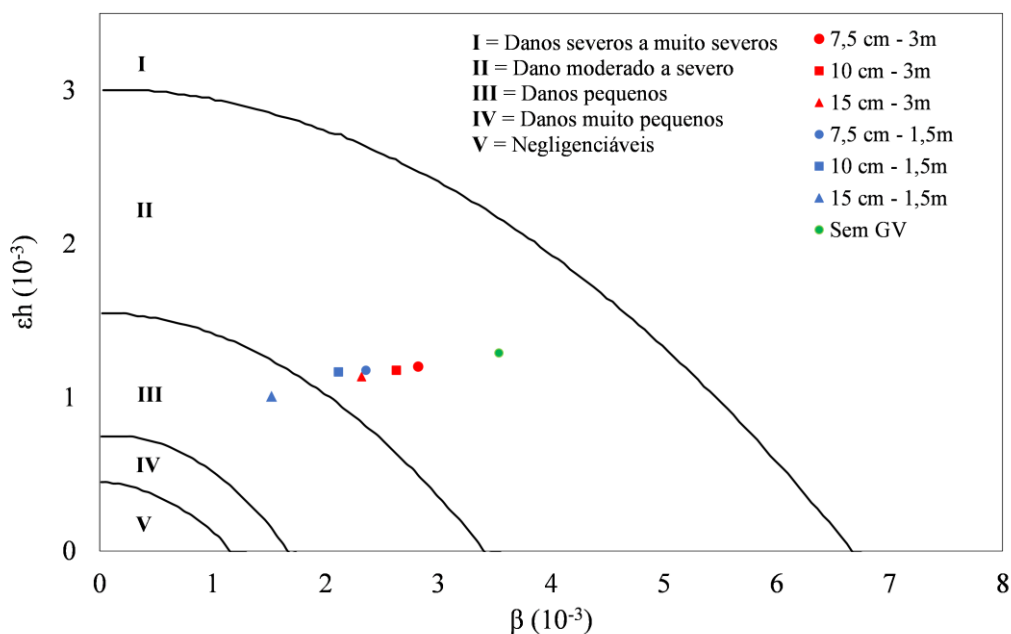


Figura 88 - Análise de danos devido à escavação – diferentes espaçamentos horizontais de grampos verticais

Tabela 27 - Distorção angular e deformação horizontal com diferentes espaçamentos horizontais de grampos verticais

Diâmetro (cm)	Espaçamento Horizontal GV (m)	εh (10^{-3})	β (10^{-3})
Sem GV	-	1,3	3,5
7,5	1,5	1,2	2,8
10	1,5	1,1	2,6
15	1,5	1,2	2,3
7,5	3	1,2	2,4
10	3	1,0	2,1
15	3	1,3	1,5

4.2.3.8 Influência nos esforços axiais dos grampos sub-horizontais

Analisou-se também a influência do grampo vertical nos esforços axiais dos grampos sub-horizontais a fim de verificar se haveria alguma redução. Tendo como base as análises realizadas até o momento, optou-se por utilizar grampos verticais de 15 cm com 12,50 m e sem inclinação. Para os *GHs* optou-se por adotar 8,0 m de comprimento ($Lh/H = 0,76$). As figuras a seguir ilustram os resultados de esforços axiais ao longo dos grampos para os modelos com e sem grampo vertical. Os níveis condizem à locação dos grampos da parte superior (Nível 1) até a inferior (Nível 7).

Como pode ser visto, com a utilização do grampo vertical há uma redução nos esforços axiais dos grampos sub-horizontais, de forma mais acentuada nos grampos superiores. Considerando todos os resultados ao longo dos grampos, em média, a redução percentual foi da ordem de 10%. Já para os grampos dos níveis 1 e 2 essa redução é da ordem de 15%.

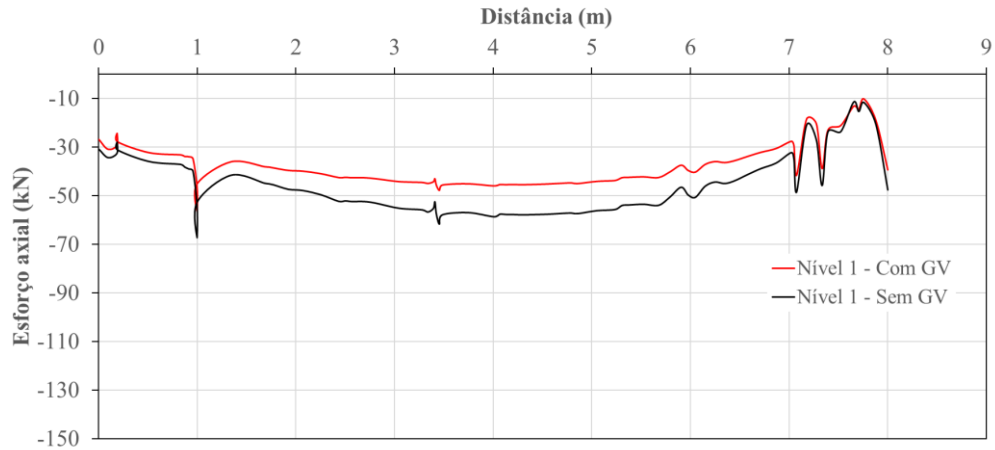


Figura 89 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 1

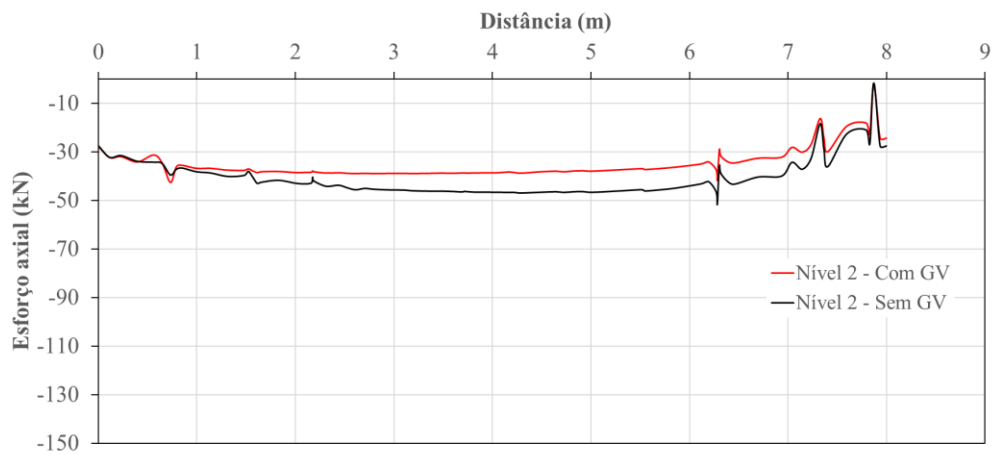


Figura 90 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 2

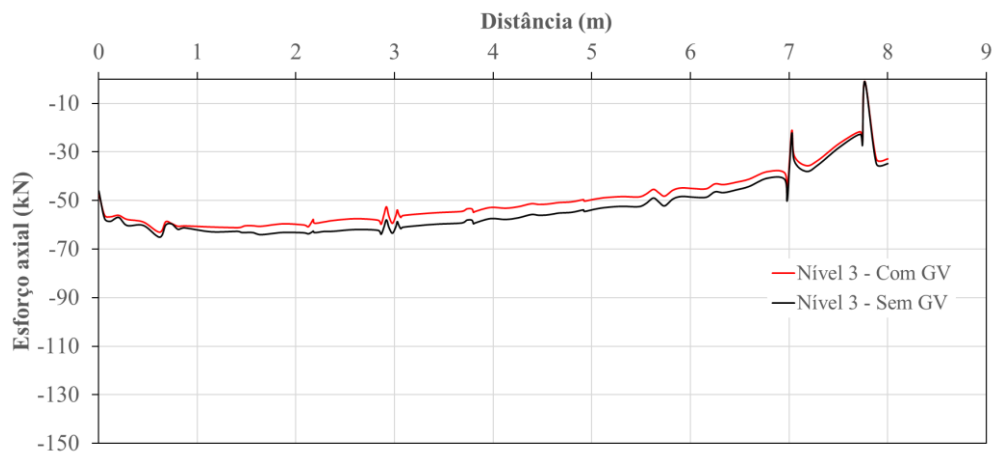


Figura 91 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 3

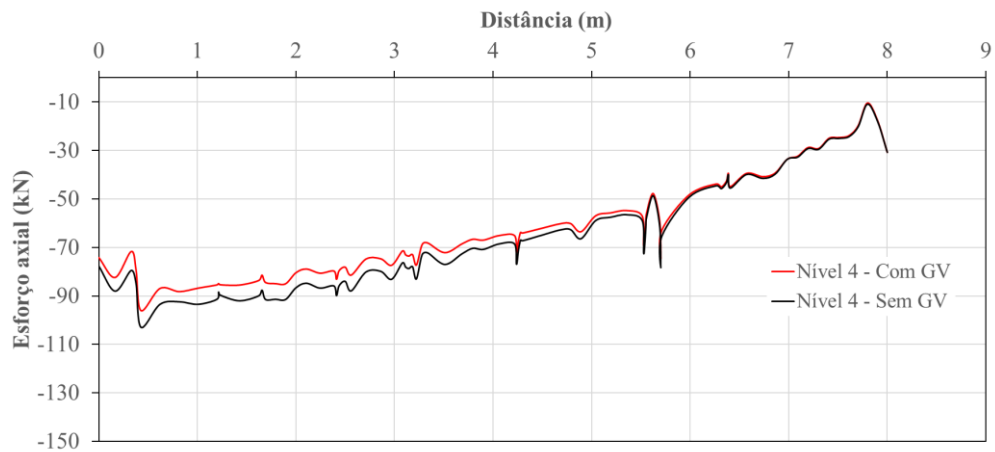


Figura 92 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 4

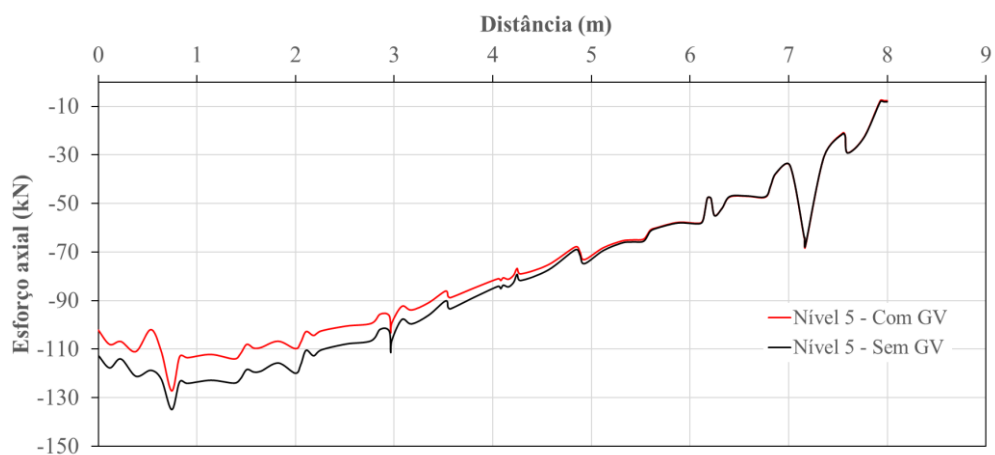


Figura 93 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais – Nível 5

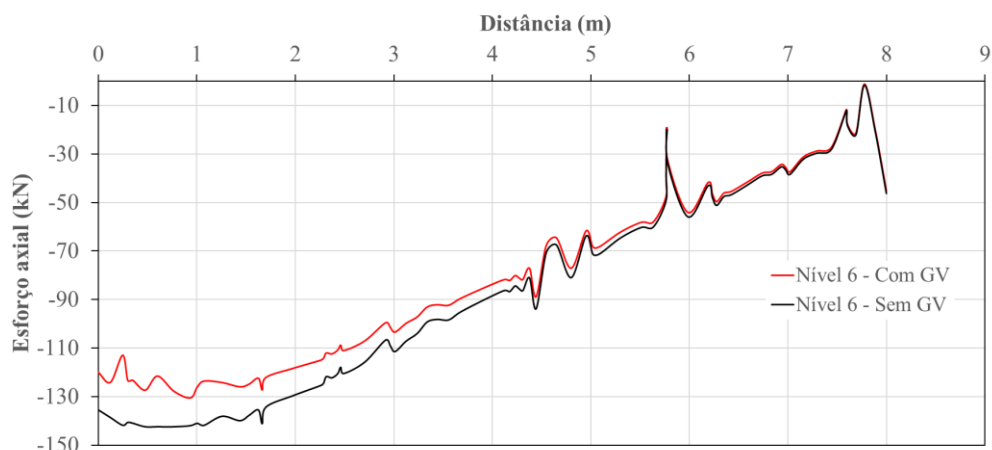


Figura 94 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 6

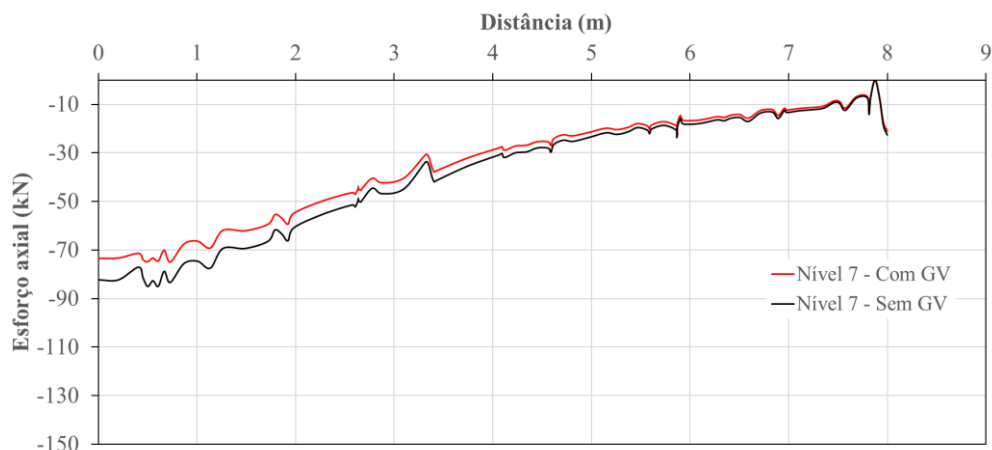


Figura 95 - Resultado de esforços axiais nos grampos sub-horizontais - Nível 7

4.2.3.9 Resumo dos resultados e comparação com resultados de literatura e campo

A Tabela 28 mostra o resumo dos resultados do estudo paramétrico. É possível concluir que (para maiores detalhes sobre as conclusões ver o capítulo 5):

- a) O *GV* teve uma influência maior na redução dos deslocamentos em solos menos resistentes e mais deformáveis;
- b) A maior rigidez do sistema leva a maiores reduções de deslocamentos. Assim, com diâmetros maiores e um maior número de *GV*, ocorre uma redução maior nos deslocamentos;
- c) Com base nas reduções tanto percentuais quanto absolutas, os parâmetros do *GV* que mais influenciaram na redução dos deslocamentos foram, pela ordem, o diâmetro com: número de linhas, L_v e depois inclinação.

- d) É preferível usar *GV* sem inclinação;
- e) Tanto *GV* quanto *GH* têm influência na redução dos deslocamentos. Portanto, é importante realizar um estudo específico para otimizar seus comprimentos;
- f) O *GV* tem maior influência na redução dos deslocamentos verticais do que o horizontais;
- g) O *GV* propicia uma redução nos esforços axiais do *GH* de até 15%.

Em relação aos resultados do estudo de sensibilidade do solo apresentados em 4.2.2, é interessante notar que a redução percentual média de $\delta_{hmáx}$ não variou significativamente independentemente da rigidez e resistência do solo. A redução percentual média foi de 22,1%. Em contraste, a redução média absoluta de $\delta_{hmáx}$ variou significativamente.

Considerando todos os resultados, a redução percentual média do $\delta_{hmáx}$ foi de 22%, enquanto o $\delta_{vmáx}$ foi de 50%, demonstrando que o *GV* tem uma influência maior na redução dos deslocamentos verticais do que horizontais.

Tabela 28 - Resumo dos resultados da análise paramétrica do grampo vertical

Análise	Redução $\delta_{hmáx}$					
	7,5 cm		10 cm		15 cm	
	\bar{x} (%)	\bar{x} (mm)	\bar{x} (%)	\bar{x} (mm)	\bar{x} (%)	\bar{x} (mm)
Lv/H	20%	12	24%	14	30%	18
Inclinação	12%	7	14%	8	17%	10
Nº linhas	24%	14	29%	17	34%	20
Lh/H	17%	9	21%	11	27%	14
Esp. Hor. <i>GV</i>	14%	8,4	17%	10,2	21%	12,6

Análise	Redução $\delta_{vmáx}$					
	7,5 cm		10 cm		15 cm	
	\bar{x} (%)	\bar{x} (mm)	\bar{x} (%)	\bar{x} (mm)	\bar{x} (%)	\bar{x} (mm)
Lv/H	40%	9,2	49%	11,3	65%	15
Inclinação	23%	5,3	29%	6,7	38%	8,7
Nº linhas	54%	12,4	65%	15	81%	18,6
Lh/H	40%	8	49%	10	67%	14
Esp. Hor. <i>GV</i>	33%	7,6	40%	9,2	54%	12,4

\bar{x} = média de resultados

Com o intuito de comparar os resultados obtidos de deslocamentos horizontais máximos no presente estudo com outros estudos disponíveis na literatura técnica, em termos de modelagem numérica, levantou-se diversos dados a partir dos estudos revisados no Tópico 2.4.6

como altura do paramento analisado, tipo de *software* e análise, modelo utilizado para o grampo vertical, quantidade de grampos verticais, deslocamentos horizontais máximos obtidos, dentre outros. Esses dados estão resumidos na Tabela 29. Nesta, o presente estudo foi denominado como “Presente estudo”. Visto que as literaturas de referência adotaram, em sua maioria, a relação do comprimento do grampo sub-horizontal e altura do paramento (Lh/H) entre 0,8 e 0,9 e diâmetros de grampos verticais no mínimo de 10 cm, do presente estudo foi incluído na tabela somente os casos de diâmetros de 10 e 15 cm com a relação Lh/H de 0,76 e 0,86.

Como pode ser visto, dentre todos os estudos, os resultados mais significativos em termos de redução porcentual foi obtido por Souza (2019) com aproximadamente 65,9%, resultando em uma diminuição de 11,2 mm. Entretanto, para essa redução a autora utilizou um grande número de grampos verticais com espaçamentos reduzidos, tornando-se uma solução pouco prática. Desconsiderando casos extremos de redução porcentual obtidos por Ferreira (2019) e Souza (2019), obtém-se uma redução média porcentual de 23,6%. O presente estudo teve uma redução porcentual média de 21,5%, muito próximo ao obtido por outros autores.

O estudo que teve uma maior efetividade na redução de deslocamentos em termos absolutos foi obtido por Zhao *et al.* (2013) com 17,1 mm de redução. Desconsiderando os casos extremos de redução milimétrica obtidos por Mucheti, Albuquerque e Garcia (2019) e Ferreira (2019), a média obtida dos demais estudos foi de 7,5 mm. Já no presente estudo, obteve-se uma média de redução milimétrica da ordem de 10,1 mm, um pouco acima dos outros autores, mas considerado próximo visto que existem diversas questões que impactam na redução do deslocamento horizontal, como já demonstrado ao longo desse estudo.

Os valores da Tabela 29 encontram-se também plotados na Figura 96. Ademais, com base nos valores apresentados na Figura 10, levantados por Pitta, Souza, & Zirlis (2003) e Bridges e Gudgin (2014) para casos de obras executadas com solo grampeado nacionalmente e internacionalmente, apresenta-se na Figura 97 uma relação entre a altura do paramento e deslocamentos horizontais máximos obtidos em casos de obra e aqueles do presente estudo. Vale destacar que do presente estudo foram plotados somente os valores resumidos na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados de deslocamentos a partir de modelagem numérica na literatura técnica sobre utilização de grampos verticais em solo grampeado

Estudo	Modelo Constitutivo	Análise	Software	Altura da escavação (m)	Lh/H	Dados grampos verticais					Resultados					
						Modelo	Diâmetro (m)	Qtd.	Espaçamento (m)	Inclinação (°)	Com GV (mm)	Sem GV (mm)	Redução (%)	Redução (mm)	%H com GV	%H sem GV
Gondim e Garcia (2018)	*	2D	RS2	5	0.80	*	0.10	1	1	0	10.4	15.6	33.3%	5.2	0.21%	0.31%
	*	2D	RS2	5	0.80	*	0.10	1	1	10	13.6	15.6	12.8%	2.0	0.27%	0.31%
Mucheti, Albuquerque e Garcia (2019)	*	2D	SIGMA/W	8.35	0.90	*	0.10	2	1	5	2.6	3.0	13.3%	0.4	0.03%	0.04%
Ferreira (2019)	Hardening Soil	3D	PLAXIS 3D	18.3	0.77	Viga	0.08	1	1	0	7.9	7.9	0.3%	0.03	0.04%	0.04%
Souza (2019)	Mohr-Coulomb	3D	PLAXIS 3D	7.5	0.80	Viga**	0.10	2	2	0	13.0	17.0	23.5%	4.0	0.17%	0.23%
		3D	PLAXIS 3D	7.5	0.80	Viga**	0.10	2	2	0	12.5	17.0	26.5%	4.5	0.17%	0.23%
		3D	PLAXIS 3D	7.5	0.80	Viga**	0.10	4	0.5	0	5.8	17.0	65.9%	11.2	0.08%	0.23%
		3D	PLAXIS 3D	7.5	0.80	Viga**	0.10	4	0.5	0	6.1	17.0	64.1%	10.9	0.08%	0.23%
Zhao et al. (2013)	*	3D	FLAC 3D	12.5	0.80	Viga	0.11	1	1.5	0	28.6	45.7	37.4%	17.1	0.23%	0.37%
Jianhua, Guang e Exaing (2012)	Hardening Soil	3D	FLAC 3D	12	0.67	Viga	0.08	1	1.5	0	28.2	33.2	15.1%	5.0	0.24%	0.28%
Zhao e Wang (2014)	Drucker-Prager e Mohr-Coulomb	2D	Z_Soil	8	1.00	Sólido	0.40	1	*	0	22.0	30.0	26.7%	8.0	0.28%	0.38%
Presente Estudo - 1	Mohr-Coulomb	3D	RS3	10.5	0.76	Viga	0.10	1	1.5	0	39.6	49.0	19.2%	9.4	0.38%	0.47%
Presente Estudo - 2		3D	RS3	10.5	0.76	Viga	0.15	1	1.5	0	36.6	49.0	25.3%	12.4	0.35%	0.47%
Presente Estudo - 3		3D	RS3	10.5	0.86	Viga	0.10	1	1.5	0	36.9	45.0	18.0%	8.1	0.35%	0.43%
Presente Estudo - 4		3D	RS3	10.5	0.86	Viga	0.15	1	1.5	0	34.4	45.0	23.6%	10.6	0.33%	0.43%

*Informações não disponíveis. ***embedded beam*.

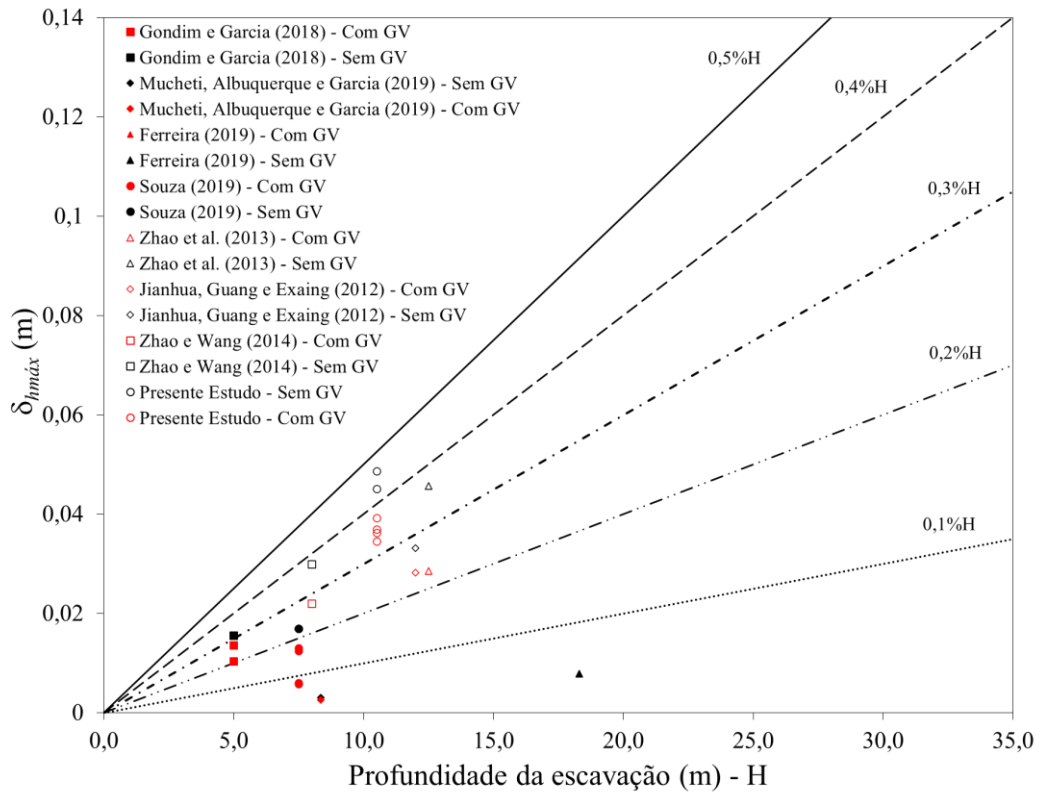


Figura 96 - Relação de deslocamento horizontal máximo e profundidade da escavação - Modelos numéricos com e sem GV

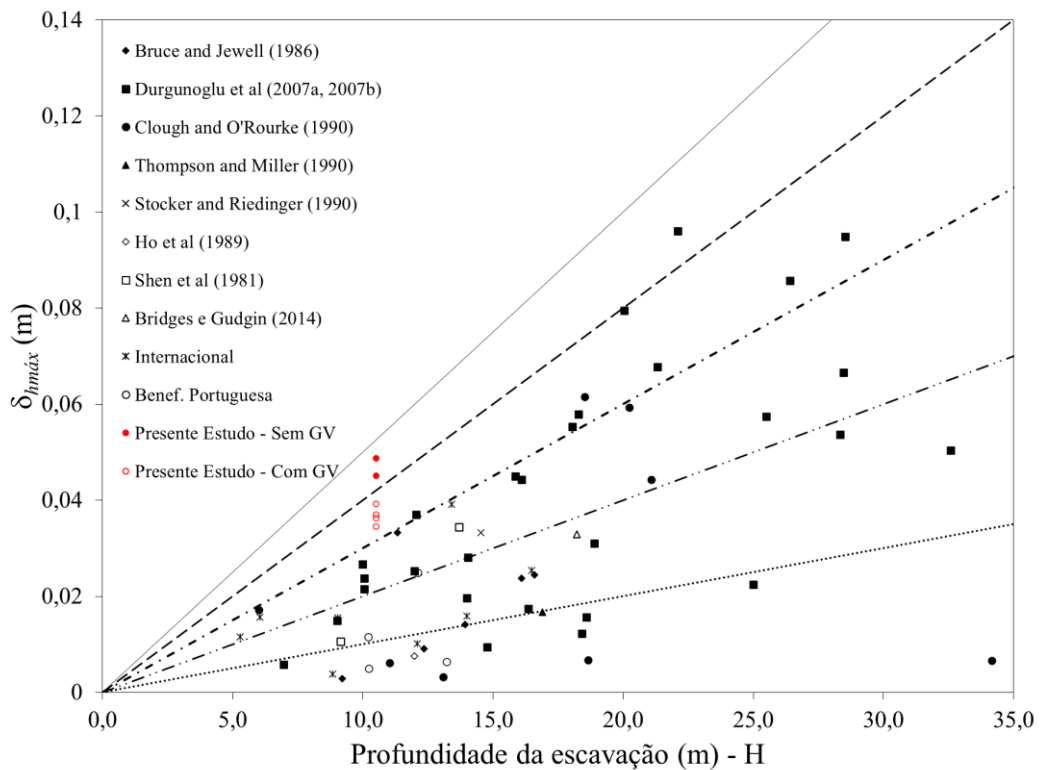


Figura 97 - Relação de deslocamento horizontal máximo e profundidade da escavação – Presente estudo e casos de obras

Em relação à Figura 97, as legendas “Internacional” e “Benef. Portuguesa” referem-se aos valores levantados por Pitta, Souza, & Zirlis (2003). Já os demais valores foram levantados por Bridges e Gudgin (2014).

Analisando a Figura 97 nota-se que os valores do presente estudo são ligeiramente maiores que casos de obras com a mesma profundidade de escavação, porém próximos, principalmente os casos com grampo vertical, ficando abaixo de $0,4\%H$. Os valores plotados dos casos de obra são dispersos e isso se deve a complexa variabilidade de fatores que influenciam a deformabilidade global do maciço de solo reforçado com e sem grampos verticais.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência do grampo vertical em estruturas de solo grampeado a luz de diferentes parâmetros inerentes ao mesmo nos deslocamentos da estrutura. A seguir encontram-se as conclusões sumarizadas:

1. Influência dos parâmetros de solo: segundo os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros de solo tanto de deformabilidade quanto de resistência, conclui-se que os grampos verticais possuem uma efetividade maior na redução de deslocamentos em solos mais deformáveis e menos resistentes. Muito provavelmente isso se deve ao fato que mesmo os grampos verticais possuindo rigidez baixa, quando inseridos em um maciço muito deformável e/ou pouco resistente leva a um aumento na rigidez global da estrutura. Dentre os parâmetros analisados, o módulo de elasticidade e ângulo de atrito foram os parâmetros que mais apresentaram influência na efetividade do grampo vertical.
2. Influência do diâmetro do *GV*: na maioria das análises realizadas no presente estudo foram considerados diferentes tipos de diâmetros de *GV*. Como era esperado, quanto maior o diâmetro maior será sua efetividade na redução de deslocamentos, tanto horizontais quanto verticais, bem como na redução de possíveis danos às estruturas lindeiras. O diâmetro que apresentou a maior redução de deslocamentos foi 15 cm. A questão da escolha do diâmetro mais adequado para ser utilizado no reforço do solo grampeado deve levar em consideração, então, os deslocamentos admissíveis e uma análise de viabilidade técnica-econômica dos diferentes cenários da solução.
3. Influência do comprimento do *GV* (L_V): o L_V influencia diretamente na redução dos deslocamentos, sendo que quanto maior seu comprimento maior a efetividade do

GV na redução de deslocamentos. No entanto, para valores maiores que $1,28H$ não se notou um aumento tão significativo na redução de deslocamentos.

4. Influência da inclinação do *GV*: analisando a influência da inclinação do grampo vertical em relação ao paramento, percebe-se uma diferença notável no que tange aos deslocamentos. Nota-se que as maiores reduções de deslocamentos ocorreram na condição com grampo vertical sem inclinação, reduzindo-se essa influência com o aumento da inclinação, sendo que com a inclinação de 10° a redução foi praticamente nula. Isso provavelmente se deve ao enrijecimento local da face do paramento que o *GV* propicia, portanto, quanto mais afastado da face menor sua efetividade. O possível efeito de ancoragem do *GV* no maciço com a adoção de inclinação, se comportando como um cavalete, não foi observado nos resultados dos modelos, pois o *GV* se deformou em conjunto com o paramento.
5. Influência da quantidade de linhas de *GV*: segundo os resultados a consideração de mais de uma linha de grampos verticais não apresentou um aumento de eficiência tão significativa na redução de deslocamentos, levando em consideração os possíveis custos envolvidos. Apesar dos resultados, chamou a atenção essa pouca efetividade. Uma hipótese recai sobre o tipo de modelagem adotada na presente pesquisa que considera o grampo vertical como um elemento de viga, sendo, assim, um elemento estrutural. Contudo, deve se lembrar que durante sua execução poderão ser aplicadas injeções pressurizadas para tratamento do solo circundante, tendo, então, um enrijecimento local do maciço. Esse efeito muito provavelmente se intensifica com adição de novas linhas de grampos verticais. No entanto, esse tipo de efeito não foi considerado na presente pesquisa.
6. Influência do comprimento do grampo sub-horizontal (*Lh*): visto que a estrutura de solo grampeado é um conjunto de diferentes elementos, caso o intuito seja reduzir os possíveis deslocamentos durante e após a escavação é necessário analisar em conjunto a eficiência dos grampos sub-horizontais e verticais. Segundo os resultados, com o aumento do comprimento dos grampos sub-horizontais menor será a efetividade dos grampos verticais na redução de deslocamentos. Apesar disso, notou-se que essa redução de efetividade se concentrou nos deslocamentos horizontais, enquanto que para deslocamentos verticais a efetividade se manteve alta e praticamente a mesma. A análise de possíveis danos às estruturas adjacentes ilustra a efetividade da verificação conjunta de comprimentos adequados de grampo sub-horizontais e grampo vertical, sendo que o caso que apresentou a maior redução de

possíveis danos, de todas aquelas analisadas no presente estudo, foi o conjunto de grampo sub-horizontal com $0,86H$ (9 m) e grampo vertical de 15 cm. Aqui vale destacar que existem outros parâmetros do grampo sub-horizontal como diâmetro do furo, diâmetro da barra, inclinação, comprimentos variados que podem também auxiliar na redução de deslocamentos, porém que não foram escopo do presente estudo.

7. Influência do espaçamento horizontal do grampo vertical: como era esperado, com o aumento do espaçamento horizontal do grampo vertical há uma diminuição na sua efetividade de redução de deslocamentos. Apesar disso, dependendo da sensibilidade das estruturas adjacentes e a redução de custos envolvidos nesse tipo de solução, talvez ela possa ser viável dependendo de caso a caso.
8. Deslocamentos horizontais e verticais: em todas as análises paramétricas do grampo vertical foram analisados a redução de deslocamentos horizontais e verticais. O grampo vertical teve uma efetividade maior na redução dos deslocamentos verticais do que nos horizontais, principalmente quando se observa também o aumento dos grampos sub-horizontais.
9. Danos às estruturas adjacentes: analisando os resultados dos modelos observou-se que a inclusão do grampo vertical ocasiona uma possível redução de danos às estruturas adjacentes, principalmente por conta da redução dos deslocamentos verticais e, conseqüentemente, na distorção angular. Nesse sentido, indica-se que a efetividade do grampo vertical deve ser analisada não somente pela redução de deslocamentos horizontais, mas também verticais e conseqüentemente aos possíveis danos às estruturas adjacentes devido às possíveis deformações ocasionadas pela escavação, obviamente levando em consideração as limitações dessas análises.
10. Os resultados de redução de deslocamentos horizontais com a utilização de grampos verticais foram similares àqueles obtidos por demais autores, conforme resumido na Tabela 29, tanto em redução porcentual quanto em magnitude.
11. Com a utilização do grampo vertical há uma redução nos esforços axiais dos grampos sub-horizontais, de forma mais acentuada nos grampos superiores. Considerando todos os resultados ao longo dos grampos, em média, a redução porcentual foi da ordem de 10%. Já para os grampos dos níveis 1 e 2 essa redução é da ordem de 15%.
12. Apesar dos resultados apresentados no presente estudo, é válido lembrar que esses foram baseados em modelagens numéricas de acordo com algumas hipóteses e

premissas. Entretanto, o tema ainda carece de maiores investigações de campo para um melhor entendimento do comportamento do grampo vertical em solos grampeados.

Como sugestão para trabalhos futuros:

1. Realizar um estudo específico sobre a influência de grampos verticais com base em levantamentos de campo;
2. Simulação numérica da influência do enrijecimento do solo devido às injeções pressurizadas nos grampos verticais e como isso impacta na redução dos deslocamentos;
3. Avaliação de outras configurações de grampo vertical e grampo sub-horizontal que não foram contempladas nesse estudo.

6 REFERÊNCIAS

- Abramento, M., Koshima, A., & Zirlis, A. casati. (1998). Reforço do Terreno. In *Fundações: Teoria e Prática* (2ª edição, p. 755).
- Alberto, E., Zirlis, C., George, E., & Teles, J. (2009). Um caso de obra especial: contenção pelo método de solo grampeado subjacente a um solo grampeado pré-existente. *Revista Brasil Engenharia*, n. 591, 120–125.
- Albuquerque, P. J. R. de, & Garcia, J. R. (2020). Recalques de Fundações Diretas. In *Engenharia de Fundações* (1 ed, pp. 94–128). LTC.
- Armour, T. A., & Cotton, D. M. (2003). Recent advances in soil nailed earth retention. *Earth Retention Systems 2003: A Joint Conference*, 1–27.
- Bishop, J., Jameson, R., & DeBernardi, B. (2009). Support of an excavation face with micropiles. *International Society for Micropiles Workshop*, 19p.
- Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (1989). Building Response To Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(1))
- Briaud, J.-L., & Lim, Y. (1997). Soil-Nailed Wall Under Piled Bridge Abutment: Simulation and Guidelines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1997\)123:11\(1043\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:11(1043))
- Bridges, C., & Gudgin, J. (2014). A soil-nailed excavation for the Brisbane airport link project, Australia. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 167(2). <https://doi.org/10.1680/geng.13.00040>
- Burland, J. B., & Wroth, C. P. (1974). Settlement of buildings and associated damage. In P. Press (Ed.), *Settlement of Structures, Proceedings of the Conference of the British Geotechnical Society* (pp. 611–654). Pentech Press.
- Bustamante, M., & Doix, B. (1985). Une methode pour le calcul des tirants et des micropieux injectes. *Bulletin de Liaison Des Laboratoires Des Ponts et Chaussees*, 140, 75–92.
- Cartier, G., & Gigan, J. P. (1983). Experiments and observations on soil nailing structures. *VIII European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 473–476.
- Cernica, J. N. (1995). *Geotechnical Engineering: Foundation Design* (J. W. & Sons (ed.)).
- Cheuk, C. Y., Ng, C. W. W., & Sun, H. W. (2005). Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects. *Computers and Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.02.005>
- Clouterre. (1991). *Recomendations Clouterre 1991 – Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing* (French National Project Clouterre, English Language Translation).
- Cotton, D. M., & Luark, R. D. (2010). Recent Advances in the Top-Down Construction of a 26.4 Meter Deep Soil Nail Retention System-Bellevue Technology Tower. *Earth Retention Conference 3*, (pp. 375-381). [https://doi.org/10.1061/41128\(384\)38](https://doi.org/10.1061/41128(384)38)
- Décourt, L., Albieiro, J. H., & Cintra, J. C. Â. (2016). Análise e projeto de fundações profundas. In *Fundações: Teoria e Prática* (3rd ed., p. 802).

- Erlich, M., & Zirlis, A. C. (2016). Reforço do Terreno. In *Fundações: Teoria e Prática* (3ª edição, p. 802).
- Fan, C. C., & Luo, J. H. (2008). Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes. *Computers and Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.09.002>
- Federal Highway Administration. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual. *Geotechnical Engineering Circular No.7*, 425 p.
- Ferreira, L. R. (2019). *Análise numérica 3d de solo grampeado em solo sedimentar com inclusões verticais [Dissertação de Mestrado]*. Universidade de Brasília.
- FHWA. (2005). Micropile design and construction (reference manual for NHI course 132078). *Federal Highway Administration FHWA-NHI-05-039*, Washington, D.C.
- Fu, W. G. (2015). The application of composite soil nailing wall in China. *15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability*, 2192–2195. <https://doi.org/10.3208/jgssp.CHN-45>
- 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. *IV Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Enconstas (COBRAE)*, 643–655.
- Gondim, A., & Garcia, J. R. (2018). Análise de estabilidade e tensão-deformação na face de escavação estabilizada com solo grampeado utilizando grampos suplementares. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica*.
- Grandis, I., & Marzionna, J. D. (2012). Escavações e Escoramentos na Cidade de São Paulo: Evolução e Tendências Futuras. *TWIN CITIES – Solos Das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba*, 337–349.
- Guilloux, A., Notte, G., & Gonin, H. (1983). Experiences on a retaining structure by nailing in moraine soils. *VIII European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 499–502.
- Guilloux, A., & Schlosser, F. (1982). Soil nailing: Practical applications. *Symp. on Soil and Rock Improvement Techniques*.
- Hachich, W., Falconi, F., Corrêa, C. N., Orlando, C., Schimdt, C., Antunes, W. R., Albuquerque, P. J. R., & Niyama, S. (2016). *Fundações: Teoria e Prática* (3ª edição).
- Hosken. (2003). Utilização de solo grampeado em área urbana. *Workshop Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*, 35–46.
- Hosseinian, S., & Seifabad, M. C. (2013). Optimization the Distance between Piles in Supporting Structure Using Soil Arching Effect. *Ojceu.Ir*, 3(6), 386–391.
- Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. *Journal of Society of Hungarian Architects and Engineers*, 7, 355–358.
- Jianhua, H., Guang, S., & Erxaing, S. (2012). Optimization simulations of support system by composite soil-nail retaining structure. *Applied Mechanics and Materials*, 166–169, 863–868. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.863>
- Jiménez, A. G. N. (2008). *Análise tensão-deformação de estruturas de solo grampeado [Dissertação de Mestrado]*. Universidade de São Paulo.

- Lima, A. P. (2002). *Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado [Dissertação de Mestrado]*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Lima, A. P., Gerscovich, D. M. S., & Sayão, A. S. F. J. (2004). Considerations on the soil nailing technique for stabilizing excavated slopes. *Landslides: Evaluation and Stabilization/Glisement de Terrain: Evaluation et Stabilisation, Set of 2 Volumes*, 1671–1676. <https://doi.org/10.1201/b16816-233>
- Lima, André P, Gerscovich, D. M. S., & Sayão, A. S. F. J. (2003). Deformability analysis of nailed slopes. *XII Panamerican Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering*, 2127–2132.
- Liu, J. Y., Liu, Y., & Song, X. H. (2017). Research on the reasonable pile spacing of micro pile composite soil nailing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 81(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012157>
- Lizzi, F. (1982). The “pali radice” (root piles) - A state-of-the-art report. *Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*, 417–432.
- Meyerhof, G. G. (1947). The settlement analysis of building frames. *Structural Engineering XXV*, 147.
- Milititsky, J. (2016). *Grandes escavações em perímetro urbano*. Oficina de textos.
- Milititsky, J., Consoli, N. C., & Schnaid, F. (2015). Patologia das Fundações. *REGET / UFSM - Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 20(1).
- Mucheti, A. S., Albuquerque, P. J. R. de, & Garcia, J. R. (2019). Contribuição de Grampos Verticais Injetados na Estabilidade e Deslocamentos de Obras de Solo Grampeado. *9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, 1–10.
- Ng, C. W. W., & Lee, G. T. K. (2002). A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces. *Computers and Geotechnics*. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(02\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(02)00012-5)
- Ortigão, J. A. R. (1997). Ensaio de arrancamento para projetos de solo grampeado. *Solos e Rochas*, 20(1), 39–43.
- Ortigão, J. A. R., Zirlis, A. C., & Palmeira, E. M. (1993). Experiência com solo grampeado no Brasil - 1970 - 1993. *Solos e Rochas*, 25(4), 291–304.
- Pascoal, J. M. C. (2015). *Interação Fundação-Solo em Ensoleiramentos: Métodos de Análise [Dissertação de Mestrado]*. Universidade de Coimbra.
- Pitta, C. A., Barbosa, M., & Assis, A. (2017). A injeção de maciços para obtenção de solo grampeado de deformações irrelevantes. *GEOCENTRO*, 6.
- Pitta, C.A., Souza, G. T. de, & Zirlis, A. C. (2013). Alguns detalhes da prática de execução do solo grampeado. *VI Conferência Brasileira de Encostas-COBRAE*, 1–24.
- Pitta, C.A., Souza, G. T. de, & Zirlis, A. C. (2003). Solo grampeado - Alguns detalhes executivos - Ensaio - Casos de obras. *Workshop Solo Grampeado, ABMS, Sinduscon/SP. Anais, São Paulo*, 1–20.
- Pitta, C.A., Zirlis, A. C., & Souza, G. T. de. (2018). *Manual de Serviços Geotécnicos Solotrat*.
- Pitta, Cairbar Azzi, Barbosa, M. V. R., Barbosa, M. G. T., & Assis, A. P. de. (2017). A injeção

- de maciços para obtenção de solo grampeado de deformações irrelevantes. *GEOCENTRO*, 6.
- Polshin, D. E., & Tokar, R. A. (1957). Maximum Allowable Non-uniform Settlement of Structures. *Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1*, 402–405.
- Poulos, H. G., Carter, J. P., & Small, J. C. (2001). Foundations and retaining structures – research and practice. *Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2527–2606.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design* (J. Wiley (ed.)).
- Pun, W. K., Cheung, W. M., & Shum, K. W. (2009). Geoguide 7 - Guide to Soil Nail Design and Construction. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-1465>
- Rocscience. (2019a). *RS2* (9.0). Rocscience.
- Rocscience. (2019b). *RS3*. Rocscience.
- RSPile. (2020). *Laterally loaded piles*.
- Shiu, Y. K., & Chang, G. W. K. (2005). *Effects of inclination, length pattern and bending stiffness of soil nails on behaviour of nailed structures* (Issue Geo Report 197).
- Singh, V. P., & Babu, G. L. S. (2010). 2D Numerical simulations of soil nail walls. *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9292-x>
- Skempton, A. W., & Macdonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6). <https://doi.org/10.1680/ipeds.1956.12202>
- Smith, I. M., & Su, N. (1997). Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(October 1995), 583–597.
- Solotrat. (2020). *Empresa especializada em Solo Grampeado*.
- Souza, T. F. de. (2019). *Análise da eficiência do uso de grampos Verticais em estruturas de solo Grampeado [Dissertação de Mestrado]*. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Souza, G., Pitta, C., & Zirlis, A. (2005). Solo grampeado - aspectos executivos do chumbador. *IV Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas*, 835–844.
- Springer, F. O. (2006). *Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss [Tese de Doutorado]*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Stauffer, S. D., Campbell, D. J., Sparks, A. E., Miller, K., & Leviant, M. (2004). Observations and performance of a soil nail shoring wall in Seattle silts and clays. *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 19p.
- Teixeira, A. H., Teixeira, A. A. H., Souza, G. J. T., Pitta, C. A., Zirlis, A. C., & Dechen, M. (2005). Um caso de obra: Aeródromo Caiapó – Mococa - SP. *IV COBRAE*, 12.
- Townsend, F. C., Anderson, J. B., & Rahelison, L. (2001). *Evaluation of FEM Engineering Parameters from Insitu Tests*.

- Yang, Y. W. (2012). Case studies of composite soil-nailing walls and movement estimate. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34(4), 734–741.
- Zhang, M., Song, E., & Chen, Z. (1999). Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM). *Computers and Geotechnics*. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(99\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(99)00025-7)
- Zhao, J., & Wang, L. L. (2014). Finite element simulation and stability analysis of composite soil nailing. *Applied Mechanics and Materials*, 580–583, 83–88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.83>
- Zhao, Y. L., Zhang, H. Bin, Zhu, Q. P., & Chen, D. (2013). Simulation analysis on tension and deformation of composite soil nailing. *Applied Mechanics and Materials*, 405–408, 182–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.182>
- Zirlis, A. C., & Azzi, C. (2000). Chumbadores injetados: a qualidade do solo grampeado. *SEFE IV – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, 1–6.