



**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO USO DE GRAMPOS
VERTICAIS EM ESTRUTURAS DE SOLO
GRAMPEADO**

Thaís Fernandes de Souza

Juiz de Fora

2019

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO USO DE GRAMPOS
VERTICAIS EM ESTRUTURAS DE SOLO
GRAMPEADO**

Thaís Fernandes de Souza

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes de Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Mário Vicente Riccio Filho - UFJF

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Souza, Thaís Fernandes de.

Análise da eficiência do uso de grampos verticais em estruturas de solo grampeado / Thaís Fernandes de Souza. -- 2019.
223 f.

Orientador: Mário Vicente Riccio Filho

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. solo grampeado. 2. Eficiência de grampos verticais. 3. Análises computacionais. 4. Rigidez relativa. I. Riccio Filho, Mário Vicente, orient. II. Título.

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO USO DE GRAMPOS
VERTICAIS EM ESTRUTURAS DE SOLO GRAMPEADO**

Thaís Fernandes de Souza

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 15 de fevereiro de 2019, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Orientador: Prof. Dr. Mário Vicente Riccio Filho – PEC-UFJF.



Membro: Prof. Dr. Mauricio Ehrlich – COPPE-UFRJ.



Membro: Prof. Dr. Marcelo Miranda Barros – PEC-UFJF.



Membro: Dr. Rafael Cerqueira Silva - Consultor

À Deus,
aos meus pais e
à todos amigos e familiares.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar, por me dar a oportunidade, a força, a sabedoria e a vida!

Ao meu orientador, Mário Vicente Riccio Filho, pela orientação dada à pesquisa, pelo apoio, pelos ensinamentos e pela disposição em ajudar.

Aos demais mestres, professores do curso de mestrado da UFJF pelo empenho para que o programa se desenvolva com qualidade. Aos colegas de mestrado pelas conversas e pela leveza que trouxeram durante as aulas do programa.

Agradeço aos meus pais, José Antônio e Lucimar, pelo amor que me dão e por me incentivarem na busca por ampliar meus conhecimentos. Aos meus irmãos pelo carinho. Aos demais familiares pela torcida e incentivo. Aos meus amigos da faculdade de engenharia, Paula, Lucas e Kamila que, mesmo longe, estiveram sempre comigo e me apoiaram e incentivaram.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais –FAPEMIG – pelo suporte financeiro dado.

Por fim, à todos aqueles que torceram e torcem sempre pelo meu sucesso e aprendizado.

*"A melhor maneira que o homem dispõe
para se aperfeiçoar, é aproximar-se de Deus".*

(Pitágoras)

Resumo

As estruturas de solo grampeado são estruturas que viabilizam cortes verticais ou subverticais, permitindo um maior aproveitamento de espaço. Este tipo de estrutura mostra-se presente tanto no meio urbano quanto rodoviário e ferroviário, por exemplo. Através da inserção de grampos na massa de solo aumenta-se o fator de segurança contra a ruptura do talude e desta forma consegue-se manter cortes na condição subvertical ou mesmo vertical estáveis. Na técnica clássica os grampos são posicionados na posição sub-horizontal. No Brasil, recentemente algumas empresas vêm utilizando o procedimento de grampos na posição subvertical ou vertical próximos à face da estrutura. O intuito desta variante da técnica clássica é aumentar a estabilidade do maciço, diminuindo as deformações horizontais finais e durante a escavação e também aumentar o fator de segurança contra ruptura. Busca-se nesta pesquisa verificar a eficiência do uso de grampos verticais posicionados próximos à face, verificando se estes grampos contribuem para redução da tração gerada nos grampos sub-horizontais, redução das deformações horizontais da face e aumento do fator de segurança da estrutura. Para modelar as estruturas será utilizado o programa de elementos finitos Plaxis 2D e o Plaxis 3D. Para analisar o fator de segurança também será utilizado o programa Slide baseado em equilíbrio limite. Os resultados para algumas análises, algumas com rigidezes usuais e outras com rigidezes mais baixas, para verificar se um sistema menos rígido sofre alterações significativas com a introdução de grampos verticais, já que um sistema muito rígido pode tornar ineficiente o uso de grampos verticais. Constatou-se através dos resultados que houve ganhos significativos para a diminuição dos deslocamentos horizontais e da tração nos grampos sub-horizontais, porém, para isso foi necessário a utilização de um número muito alto de grampos verticais, o que pode não ser economicamente viável.

Abstract

Soil nailing structures are structures that enable vertical or sub-vertical cuts, allowing a greater use of space. This type of structure is present in urban, road and railways, for example. Through the insertion of nails in the soil mass increases the safety factor against the slope rupture and in this way it is possible to maintain cuts in the subvertical or even vertical stability. In the classic technique the nails are positioned in the sub-horizontal position. In Brazil, some companies have recently been used the procedure in the subvertical or vertical position near the face of the structure. The aim of this variant of the classical technique is to increase the stability of the massif, reducing the final horizontal deformations and during the excavation and also increase the safety factor against rupture. The aim of this research was to verify the efficiency of the use of vertical nails positioned close to the face, verifying if these nails contribute to reduction of the traction generated in the sub-horizontal nails, reduction of the horizontal deformations of the face and increase of the factor of safety of the structure. To model the structures will be used the finite element program Plaxis 2D and Plaxis 3D. To analyze the safety factor it will also be used the program Slide based on equilibrium limit. The results for some analyzes, some with usual rigidities and others with lower rigidities, to verify if a less rigid system undergoes significant changes with the introduction of vertical nails, since a very rigid system can make the use of vertical nails inefficient. The results showed that there were significant gains for the reduction of horizontal displacements and traction in the sub-horizontal nails, but for this it was necessary to use a very high number of vertical nails, which may not be economically feasible.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Exemplos de faces das estruturas de solo grampeado (Clouterre, 1991).....	4
Figura 2.2: Fases construtivas de uma parede de solo grampeado (Clouterre, 1991).	5
Figura 2.3: Aplicação de concreto projetado de proteção (Clouterre,1991).	6
Figura 2.4: seção da obra instrumentada por Silva (2015).	8
Figura 2.5: Ensaios de arrancamento: (a) montagem e injeção dos grampos e (b) sistema de aplicação de carga (Feijó; Ehrlich, 2001).	10
Figura 2.6:Paralisação do Ensaio de Arrancamento: Força Máxima e Estabilização da força (Modificado de Clouterre, 1991).	11
Figura 2.7: Distribuição das forças axiais e deslocamentos horizontais de uma escavação grampeada (Lazarte <i>et al.</i> , 2003 <i>apud</i> Silva, 2015).	13
Figura 2.8: Evolução de $T_0/T_{máx}$ com avanço da escavação (Clouterre, 1991).	14
Figura 2.9: Efeito da rigidez dos reforços nas tensões e deformações mobilizadas: (a) reforços flexíveis e (b) reforços rígidos (Mitchell e Villet, 1987).	15
Figura 2.10: Influência da rigidez do grampo nas deformações e tensões mobilizadas.....	16
Figura 2.11: Influência da rigidez do grampo: (a) deslocamento horizontal da face; (b) força axial no grampo; e (c) momentos fletores (Ehrlich <i>et al.</i> , 1996).	18
Figura 2.12: Importância da face: (a) Talude vertical; (b) Talude com inclinação suave	19
Figura 2.13: Estado de tensões no solo de um estrutura grampeada, comparação entre as condições de repouso (K0) e ativa (Ka): (a) e (b) obras monitoradas (Cartier e Gigan, 1983 e	

Clouterre, 1991); (c) monitoração de modelos em escala reduzida (Clouterre, 1991) e (d) modelagem numérica (Clouterre, 1991).....	21
Figura 2.14: Deformações no solo grampeado (Clouterre, 1991).	22
Figura 2.15: Relação entre deslocamentos medidos no topo da face de estrutura de solo grampeado (Clouterre, 1991).....	23
Figura 2.16: Influência da rigidez da face: (a) deslocamento horizontal da face; (b)	24
Figura 2.17: Tipos de ruptura que podem ocorrer nas estruturas de solo grampeado. a) interna; b) externa; e c) mista (Clouterre, 1991).....	25
Figura 2.18: Construção de estrutura grampeada próxima ao fator de segurança unitário com redução da coesão aparente até a ruptura (Clouterre, 1991).....	26
Figura 2.19: Forma deformada do solo grampeado Eparris Wall (1980) após a ruptura	27
Figura 2.20: Ruptura induzida através da redução gradual do comprimento dos	28
Figura 2.21: Comparação entre deslocamentos horizontais máximos: (a) solo grampeado e; muros de solos reforçados (b) mal compactados ou de grande altura e (c) bem compactados.	29
Figura 2.22: Comparação entre as técnicas de estabilização solo grampeado x cortina ancorada (Mitchell; Villet, 1987).	31
Figura 2.23: Estabilização do talude com contenção mista para minimizar os deslocamentos em função do gasoduto (Clouterre, 1991).	33
Figura 2.24: Relação entre N e o módulo de Young de solos residuais (Sandroni, 1991).....	34
Figura 2.25: Representação das forças em uma fatia no método de Bishop simplificado (Silva, 2013).....	36

Figura 3.1: Geometria padrão no software <i>slide</i>	38
Figura 3.2: Modelagem no <i>slide</i> com 2 grampos verticais.....	40
Figura 3.3: região dos centros das possíveis superfícies de ruptura.....	42
Figura 3.4: Configurações gerais do modelo padrão.....	45
Figura 3.5: Deformação Plana (BRINKGREVE <i>et al.</i> , 2002).....	46
Figura 3.6: 15 nós (BRINKGREVE <i>et al.</i> , 2002).....	46
Figura 3.7: Geometria do modelo padrão.....	47
Figura 3.8: Análise com 2 grampos verticais modelada com elemento “geogrid”.	48
Figura 3.9: Esquema da parede de concreto projetado em um comprimento de 1 m e altura de 3 m.....	51
Figura 3.10: Esquema da Seção Transversal do grampo.....	52
Figura 3.11: Malha de elementos finitos gerada pelo programa.	54
Figura 3.12: poropressões iniciais no modelo.	55
Figura 3.13: Fase 1: Escavação, instalação do grampo e revestimento com concreto projetado	57
Figura 3.14: Configurações de cálculo na plataforma <i>calculation</i>	58
Figura 3.15: deslocamentos horizontais apresentados na plataforma output.	59
Figura 3.16: Estrutura padrão modelada com o elemento “plate”.....	60
Figura 3.17: Análise com 2 grampos verticais modelada com elemento “plate”.....	60
Figura 3.18: Janela propriedades do projeto.....	64

Figura 3.19: janela onde é criado o furo e definidas as divisões e a posição do NA.	64
Figura 3.20: janela onde são definidas as propriedades dos solos.....	65
Figura 3.21: janela onde são inseridas as propriedades da parede de concreto projetado.....	66
Figura 3.22: Propriedades definidas para os grampos.....	67
Figura 3.23: Modelo da estrutura padrão, vista em perspectiva, muro com altura igual a 7,5 m, largura igual a 8 m, profundidade igual a 5 m.....	68
Figura 3.24: Estrutura padrão modelada no Plaxis 3D.....	68
Figura 3.25: Modelo da estrutura com 4 grampos verticais, vista em perspectiva e frontal. ...	69
Figura 3.26: Opções de refinamento da malha.....	70
Figura 3.27: Erro encontrado pelo software.	70
Figura 3.28: visualização da malha (refinamento muito fino).....	71
Figura 3.29: Última fase de construção.....	72
Figura 3.30: Propriedades dos grampos sub-horizontais para estrutura de baixa rigidez relativa.....	75
Figura 4.1: Fatores de segurança encontrados em cada software para as análises 7,5_N0_S'H2 (padrão), 7,5_S4_S'H2_S'V2 e 7,5_S4_S'H2_S'V0,5.....	77
Figura 4.2: Somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais para análises 7,5_N0_S'H2 (padrão), 7,5_S4_S'H2_S'V2 e 7,5_S4_S'H2_S'V0,5.	78
Figura 4.3: Deslocamento horizontal na face para a estrutura padrão - análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.....	79

Figura 4.4: Deslocamento horizontal na face para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.....	80
Figura 4.5: Deslocamento horizontal na face para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.....	81
Figura 4.6: Deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical no topo.....	82
Figura 4.7: Deslocamento horizontal na face para cada etapa de escavação para a análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 3D.....	83
Figura 4.8: Deslocamento horizontal na face para cada etapa de escavação para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 3D.....	84
Figura 4.9: Deslocamento horizontal na face para cada etapa de escavação para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 3D.....	85
Figura 4.10: Possível superfície de ruptura para a análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 3D.....	86
Figura 4.11: Possível superfície de ruptura para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 3D.....	86
Figura 4.12: Possível superfície de ruptura para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 3D.....	87
Figura 4.13: Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais para a análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 3D.....	88
Figura 4.14: Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 3D.....	89

Figura 4.15: Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 3D.....	90
Figura 4.16: Fatores de segurança encontrados em cada software para as análises 9_N0_S'H2 e 9_S4_S'H2_S'V0,5.	91
Figura 4.17: Deslocamento horizontal na face para a análise 9_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.....	92
Figura 4.18: Deslocamento horizontal na face para a análise 9_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.....	92
Figura 4.19: Somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais para análises 9_N0_S'H2 e 9_S4_S'H2_S'V0,5.....	93
Figura 4.20: Fatores de segurança encontrados para as análises 9_N0_S'H3_BR, 9_S4_S'H3_S'V2_BR e 9_S4_S'H3_S'V0,5_BR	94
Figura 4.21: Deslocamentos na face da escavação para as análises 9_N0_S'H3_BR, 9_S4_S'H3_S'V2_BR e 9_S4_S'H3_S'V0,5_BR.	95
Figura 4.22: Somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais para análises 9_N0_S'H3_BR, 9_S4_S'H3_S'V2_BR e 9_S4_S'H3_S'V0,5_BR.....	96
Figura 4.23: Resultados de rigidez relativa de obras realizadas no Brasil.	97

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: propriedades do solo e modelo construtivo.....	38
Tabela 3.2: Propriedades dos grampos horizontais e espaçamento horizontal.....	39
Tabela 3.3:Cargas de Trabalho para Ancoragens no Terreno (Protendidos Dywidag Ltda, 2017).....	39
Tabela 3.4: Análises efetuadas pelo método do equilíbrio limite no plaxis 2D (“plate”).....	41
Tabela 3.5: Análises efetuadas pelo método dos elementos finitos plaxis 2D (“geogrid”).....	44
Tabela 3.6: Fator de segurança encontrados para modelagem com e sem o elemento interface.....	48
Tabela 3.7: Propriedades e parâmetros do solo.....	49
Tabela 3.8: Propriedades da parede de concreto projetado.....	52
Tabela 3.9: Propriedades dos grampos.....	53
Tabela 3.10: Propriedades dos grampos modelados como plate e com espaçamento horizontal igual a 2 m.....	61
Tabela 3.11:Propriedades dos grampos modelados como plate e com espaçamento horizontal igual a 0,5 m.....	62
Tabela 3.12: Análises efetuadas pelo método dos elementos finitos plaxis 3D.....	63
Tabela 3.13: análises 3D com parâmetros e rigidez reduzidos.....	73
Tabela 3.14: propriedades utilizadas para o solo nas análises com menor rigidez relativa.....	74
Tabela 4.1: Resumo contendo os resultados numéricos de todas as análises.....	99

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação para o desenvolvimento do estudo	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Organização do trabalho.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	Solos Grampeados	3
2.2.	Execução da técnica.....	4
2.3.	Uso de grampos verticais	7
2.4.	Comportamento geomecânico das estruturas de solo grampeado.....	9
2.4.1.	Interação solo-grampo.....	9
2.4.2.	Tensão nos grampos	12
2.4.3.	Rigidez nos grampos	14
2.4.4.	Inclinação dos taludes grampeados	19
2.4.5.	Estado de tensões nos solos grampeados.....	19
2.4.6.	Deslocamentos e deformações nos solos grampeados	21
2.4.7.	Faceamento do solo grampeado	23
2.4.8.	Tipos de ruptura em solos grampeados	24
2.5.	Comparação com outras técnicas.....	28
2.5.2.	Solo grampeado <i>versus</i> muro de solo reforçado.....	28
2.5.3.	Solo grampeado versus cortina atirantada.....	29
2.6.	Vantagens e desvantagens da técnica.....	31
2.7.	Estimativa do módulo de elasticidade do solo.....	33

2.8.	Métodos de análise: equilíbrio limite e método numérico.	34
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1.	Modelagem pelo método do equilíbrio limite	37
3.1.1.	Geometria	37
3.1.2.	Propriedades dos materiais	38
3.2.	Modelagem numérica no software Plaxis 2D com elemento “geogrid”	43
3.2.1.	Plataforma <i>input</i>	45
3.2.1.3.	Propriedades dos materiais	49
3.2.1.4.	Geração da malha de elementos finitos	53
3.2.1.5.	Condições iniciais	54
3.2.2.	Plataforma <i>Calculation</i>	56
3.2.2.1.	Plataforma <i>output</i> e <i>curves</i>	58
3.3.	Modelagem numérica no software Plaxis 2D com elemento “plate”	59
3.4.	Modelagem numérica no software Plaxis 3D	62
3.5.	Modelagem para análise com parâmetros do solo e rigidez relativa (S_i) reduzidos	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1.	Comparativo de Fator de segurança	76
4.2.	Comparativo do somatório de tração máxima nos grampos sub-horizontais	77
4.3.	Comparativo do deslocamento horizontal (δ_h) final da face	78
4.4.	Comparação da relação entre deslocamento horizontal e vertical no topo	81
4.5.	Evolução do deslocamento horizontal da face ao longo da construção	82
4.6.	Superfície de ruptura	85
4.7.	Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais	87

4.8.	Fator de segurança para escavação com altura igual a 9 m	90
4.9.	Deslocamento horizontal na face para escavação com altura igual a 9m.....	91
4.10.	Somatório de trações máximas para escavação com altura igual a 9 m.....	93
4.11.	Análise com parâmetros do solo e rigidez relativa (S_i) reduzidos.....	93
4.12.	Considerações sobre rigidez relativa	96
4.13.	Resumo dos resultados	97
5.	CONCLUSÕES.....	100
5.1.	Quanto à modelagem.....	100
5.2.	Quanto ao Fator de Segurança.....	100
5.3.	Quanto à tração máxima nos grampos sub-horizontais.....	101
5.4.	Quanto ao deslocamento horizontal na face.....	101
5.5.	Quanto à relação entre deslocamento vertical e horizontal no topo da escavação	101
5.6.	Quanto à superfície de ruptura	102
5.7.	Quanto às estruturas de baixa rigidez	102
5.8.	Quanto à eficiência dos grampos verticais	102
5.9.	Sugestões para pesquisas futuras	103
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – DESLOCAMENTO HORIZONTAL VERSUS PROFUNDIDADE	107
	APÊNDICE B – FATOR DE SEGURANÇA.....	114
	APÊNDICE C – TRAÇÃO NOS GRAMPOS	122

APÊNDICE D – DESLOCAMENTO HORIZONTAL <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO VERTICAL	129
APÊNDICE E – ESTRUTURA DEFORMADA AUMENTADA EM 40 VEZES – PLAXIS 2D	140
APÊNDICE F – ESTRUTURA DEFORMADA AUMENTADA EM 40 VEZES – PLAXIS 3D	152
ANEXO A - ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO.....	159

1 Introdução

1.1 Motivação para o desenvolvimento do estudo

As estruturas de solo grampeado são estruturas que viabilizam cortes verticais ou subverticais, permitindo um maior aproveitamento de espaço. Esta tecnologia é utilizada em obras de infraestrutura como rodovias e ferrovias e em áreas urbanas. A contenção em solo grampeado consiste na introdução de grampos no interior da massa de solo, à medida que esta é escavada (método “top-down”). No solo grampeado à medida que as deformações ocorrem, a carga nos grampos é mobilizada. Os grampos não são protendidos, como na cortina ancorada. Normalmente a face da estrutura é revestida com tela de aço e concreto projetado.

Na técnica clássica os grampos são posicionados na posição sub-horizontal. Recentemente, no Brasil, algumas empresas vêm utilizando o procedimento de grampos na posição subvertical ou vertical próximos à face da estrutura, além dos grampos sub-horizontais. Este procedimento aumenta os custos da obra e o tempo de execução.

1.2 Objetivo

Busca-se nesta pesquisa verificar a eficiência do uso de grampos verticais posicionados próximos à face, verificando principalmente se estes grampos contribuem para redução da tração gerada nos grampos sub-horizontais e se contribuem para a redução das deformações horizontais da face. Será verificada também a influência dos grampos verticais no fator de segurança da estrutura. O trabalho será desenvolvido utilizando-se o programa PLAXIS 2D e o PLAXIS 3D. Será utilizado também, para análise do fator de segurança, o programa slide.

1.3 Organização do trabalho

No capítulo 1 é apresentada uma introdução geral sobre o assunto, a motivação para o desenvolvimento da pesquisa, incluindo objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica e são apresentadas conceituações sobre a técnica, mecanismos e comportamento, bem como os métodos clássicos de dimensionamento.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia e equipamentos empregados nas análises.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados das análises efetuadas utilizando o software plaxis, versões 2D e 3D.

As conclusões, comentários e sugestões estão indicados no capítulo 5.

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Solos Grampeados

Solo grampeado é uma técnica utilizada para conter e estabilizar taludes. Este método consiste em incluir reforços em encostas e escavações. Esses reforços são chamados de grampos, e são introduzidos no solo. Segundo a ABNT NBR 11682 (2009), o grampo é um elemento de reforço do terreno que constitui de perfuração preenchida com calda de cimento, ou argamassa, compósito ou outro aglutinante e é um elemento resistente à tração/cisalhamento. Sua finalidade é de distribuir as cargas ao longo de todo o seu comprimento, havendo interação com o terreno circunvizinho, podendo ser absorvida pela cabeça, parte da carga mobilizada. A mobilização de carga no grampo é induzida pela deformação do terreno por uma pequena carga aplicada na extremidade externa. Os grampos diferem dos tirantes porque são elementos passivos e não possuem trecho livre.

Clouterre (1991) descreveu a técnica de paredes de solos grampeados. A técnica consiste em reforçar o solo à medida que o mesmo é escavado de cima para baixo, introduzindo barras passivas que trabalham sob tração. Estas barras são introduzidas paralelamente umas às outras e possui ligeira inclinação com a direção horizontal. O atrito entre os grampos e o solo induz a tensão nos grampos.

Para proteger a face do solo, geralmente utiliza-se uma tela metálica sob concreto projetado, concreto com fibra ou somente proteção vegetal. A face pode ter diferentes inclinações com a direção vertical ou ser feita em bancos, como mostra a Figura 2.1. Pela definição, conclui-se que é difícil construir uma parede de solo grampeado sob o nível d'água, sendo necessários neste caso, procedimentos de drenagem e rebaixamento de nível d'água (Clouterre, 1991).

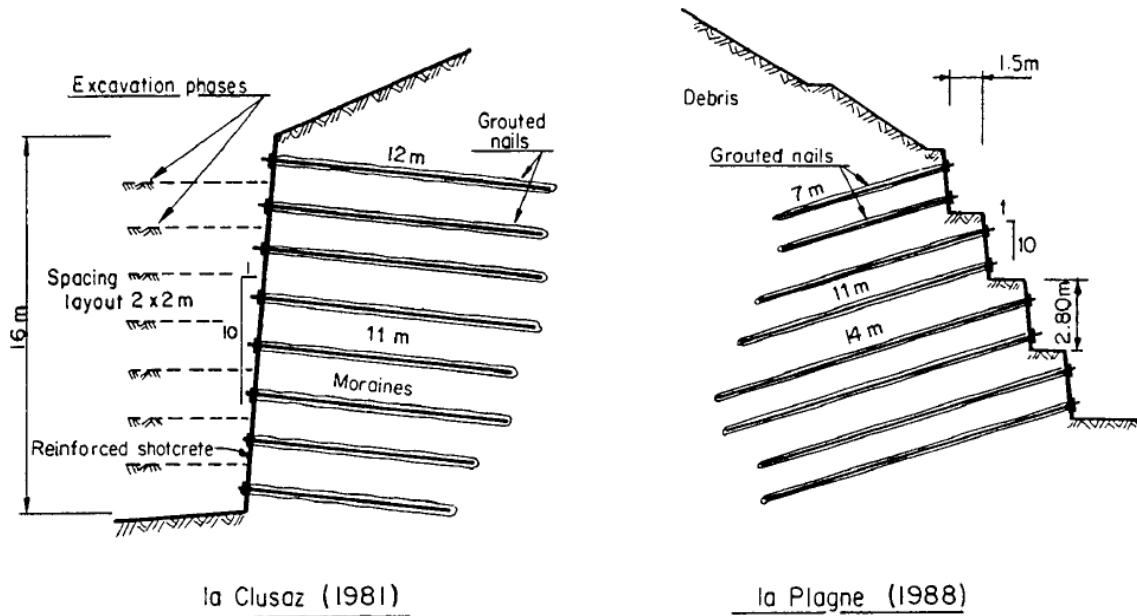


Figura 2.1: Exemplos de faces das estruturas de solo grampeado (Clouterre, 1991).

2.2. Execução da técnica.

Uma estrutura em solo grampeado é executada introduzindo-se barras de aço em furos preenchidos com calda de cimento. Essas barras trabalham à tração, podendo trabalhar também ao cisalhamento e à flexão. Essas barras são introduzidas formando um ângulo que varia entre 5 e 30 graus com a horizontal, por isso, os grampos são denominados muitas vezes como grampos sub-horizontais. A execução dos grampos deve ser feita o mais rápido possível, devido ao fato de que a escavação e a introdução dos grampos geram movimentos no maciço, inclusive na face da estrutura.

Uma parede de solo grampeado é construída em sucessivas fases, iniciando de cima para baixo, compreendendo as etapas de:

- 1) Escavação
- 2) Perfuração e instalação dos grampos
- 3) Proteção da face
- 4) Repetição do processo até atingir a altura de projeto

A Figura 2.2 apresenta cada uma das etapas construtivas.

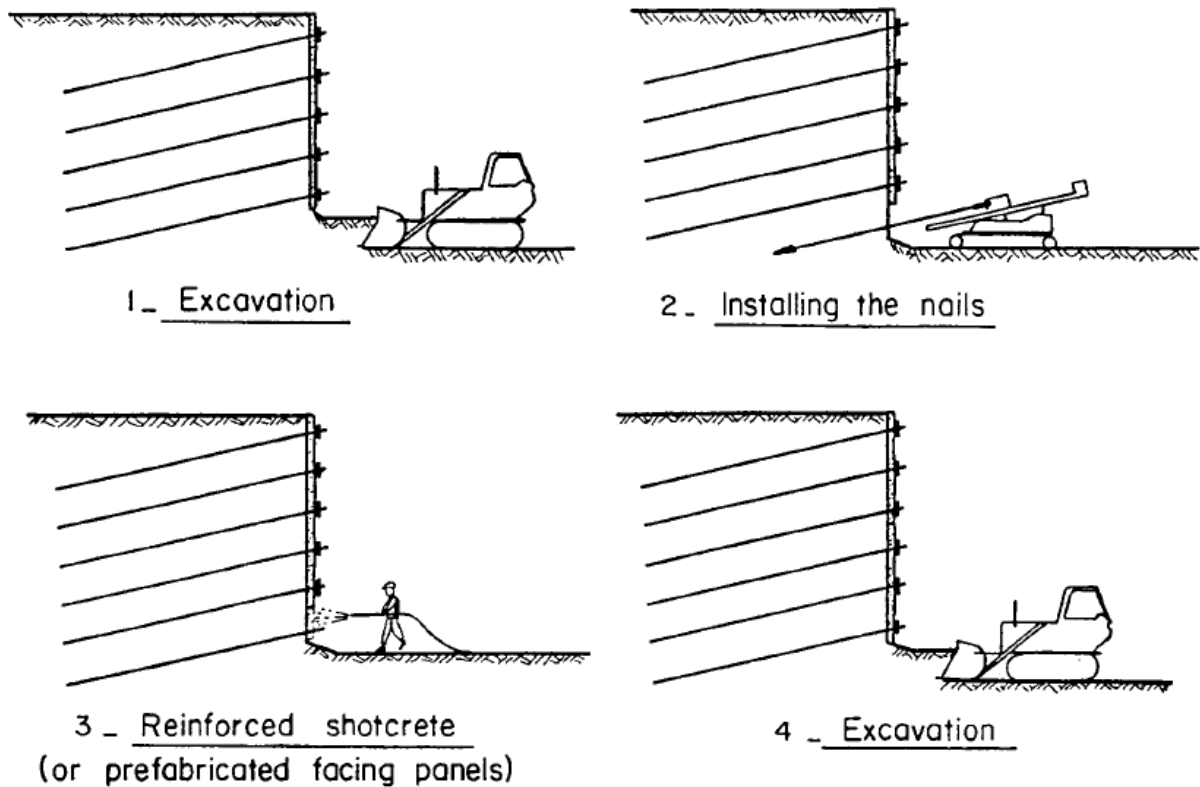


Figura 2.2: Fases construtivas de uma parede de solo grampeado (Clouterre, 1991).

Durante a fase de escavação o solo deve se manter estável. Isso exige um pouco de coesão do solo, mesmo que pequena. As fases 2 e 3 podem ser executadas nesta ordem ou podem ser revertidos, ou seja, o concreto projetado pode ser aplicado antes da introdução dos grampos.

Uma fina camada de concreto projetado minimiza os efeitos das intempéries, pois a escavação provoca o desconfinamento do solo, deixando-o exposto à ação de agentes físicos e químicos, que podem provocar desagregações superficiais e rupturas localizadas. A Figura 2.3 ilustra o processo de aplicação da camada de concreto.

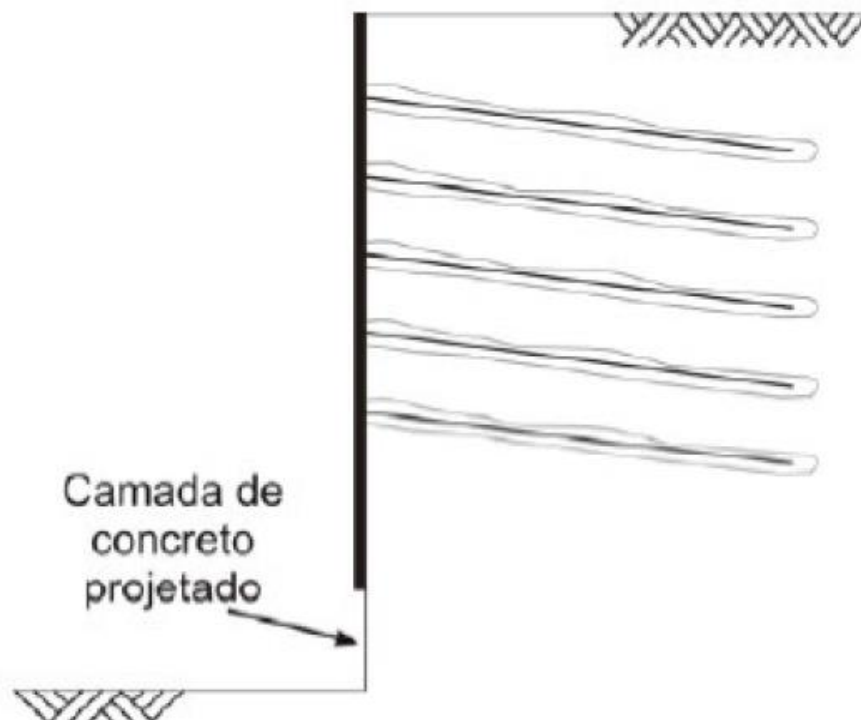


Figura 2.3: Aplicação de concreto projetado de proteção (Clouterre,1991).

Os grampos devem ser instalados imediatamente após a finalização das fases de escavação, e podem ocorrer de duas maneiras principais:

-Por perfuração, quando são colocados em furos pré-abertos preenchidos com pasta de cimento ou argamassa, executado em ação conjunta com a inserção da barra de aço; ou

-Por métodos de cravação, sendo por percussão ou vibro-perfuração. Muito utilizado em solos com baixa resistência e que não possuam interferências em seu interior, tais como, blocos de rocha, estruturas de concreto entre outras.

Outras técnicas estão sendo desenvolvidas atualmente. Estas combinam a condução de vibração com processos de injeção.

A infiltração de água no solo pode ocasionar cargas hidráulicas na face, aumentando o empuxo que atua sobre esta, podendo levar a estrutura à ruptura. A água tem a capacidade de influenciar na resistência ao cisalhamento do solo reduzindo seus parâmetros de resistência, alterar o peso específico da massa de solo e ainda acelerar o processo de corrosão nas barras

de aço dos grampos, sendo este fato agravado caso a água apresente substâncias agressivas em sua composição.

Por isso é importante que sejam tomadas medidas de drenagem eficiente superficial e profunda (Clouterre, 1991). O sistema de drenagem deve oferecer um fluxo organizado para as águas internas ou externas que convergem para o solo grampeado. Para a drenagem profunda se utiliza o Dreno Sub-horizontal Profundo, DHP. Já para a drenagem de superfície aplicam-se os drenos de paramento e as canaletas (Ehrlich; Zirlis, 2016).

O dreno profundo é um elemento que possui a função de captar as águas profundas e distantes da face antes que elas aflorem na mesma. Essas águas são captadas por meio dos drenos sub-horizontais profundos, DHP, que consistem em tubos plásticos drenantes de 32 a 50 mm de diâmetro, inseridos em perfurações no solo de 64 a 100 mm de diâmetro com comprimentos variando de 6 a 24 metros. Esses drenos conduzem as águas ao paramento e estas são despejadas nas canaletas (drenos superficiais) (Ehrlich; Zirlis, 2016).

Recomenda-se o uso de drenos profundos, de paramento e superficiais mesmo quando não há indicação de água no solo, principalmente em áreas urbanas, onde existe a possibilidade de vazamentos nas redes públicas de drenagem, águas e esgoto. Os DHP podem ser utilizados junto à superfície acima do topo do talude, pois as camadas superficiais são muito drenantes, mesmo quando cobertas com calçada (Ehrlich; Zirlis, 2016).

2.3. Uso de grampos verticais

A introdução de grampos verticais ou subverticais (grampos com inclinações um pouco superiores ou inferiores a 90°) em estruturas de solos grampeados vem sendo utilizada recentemente no Brasil. Algumas empresas que executam obras geotécnicas pelo Brasil, realizaram algumas obras em solo grampeado utilizando-se os grampos verticais.

Um exemplo de obra onde foram utilizados grampos verticais é Silva (2015). Ele realizou o monitoramento de uma estrutura de solo grampeado na cidade de Juiz de fora. Foram monitorados os grampos sub-horizontais, porém não foi verificado se o uso dos elementos verticais teve ou não influência nos grampos sub-horizontais. Ele somente concluiu que, esses elementos verticais, aparentemente não alteraram as forças axiais mobilizadas nos

De acordo com Ehrlich e Zirlis (2016), devido a alta produtividade da técnica de solo grampeado, esta demanda uma alta velocidade de escavação e, por isso alguns cuidados devem ser tomados, como a execução de grampos verticais colocados antes do início da escavação junto à face da escavação. Porém, como dito na introdução, não há estudos que qualifiquem e/ou quantifiquem a eficiência do uso destes grampos verticais na estrutura de solo grampeado.

2.4. Comportamento geomecânico das estruturas de solo grampeado

2.4.1. Interação solo-grampo.

Para saber como é o comportamento do solo na superfície de contato com o grampo, é necessário conhecer parâmetros do solo, como as propriedades do solo, as características do reforço, além do método utilizado para a execução do solo grampeado (Silva, 2015).

De acordo com Clouterre (1991) a interação entre solo e grampo se dá de duas formas. A primeira diz respeito ao atrito desenvolvido no contato solo/grampo que é a resistência ao arrancamento (q_s). A segunda, de importância menor, refere-se à tensão passiva ao longo do grampo, que pode mobilizar esforços cisalhantes e de flexão caso venha a desenvolver-se uma zona de cisalhamento no maciço de solo reforçado e o grampo tenha rigidez suficiente para resistir.

A metodologia de execução mais as propriedades e características do solo/grampo influenciam o valor da resistência ao arrancamento (q_s). Ao submeter solos granulares a esforços cisalhantes, estes tendem a aumentar o volume da área de envolvimento do grampo. Este fato acrescenta tensão na tensão normal inicial (σ'_v) existente na superfície do grampo (Clouterre, 1991).

A tendência de expansão ocorrida pelo cisalhamento solo-grampo, quando este é mobilizado, influencia fortemente a tensão normal mobilizada no grampo. A avaliação desta tensão é difícil, pois é função da consistência/compacidade do solo. Portanto, a tensão normal no grampo não é a tensão normal correspondente a profundidade e ao peso específico do solo (Feijó, 2007).

Para determinação do atrito entre o solo e o grampo, é necessário conhecer a resistência ao arrancamento. Não existe, ainda, alguma norma que regulamente o ensaio. No entanto, Feijó e Ehrlich (2001 e 2005) e Springer (2006) fazem recomendações para o procedimento do ensaio.

Para executar o ensaio, deve-se tracionar o grampo utilizando um macaco hidráulico, que visa incrementar consecutivamente cargas na barra de aço, chegando até a ruptura. Mede-se as cargas por uma célula de carga e os deslocamentos sofridos na extremidade do grampo devido ao acréscimo de carga são medidos por extensômetros.

A Figura 2.5 mostra alguns detalhes da montagem do ensaio. A instalação dos grampos deve seguir o mesmo procedimento daquele executado na obra.

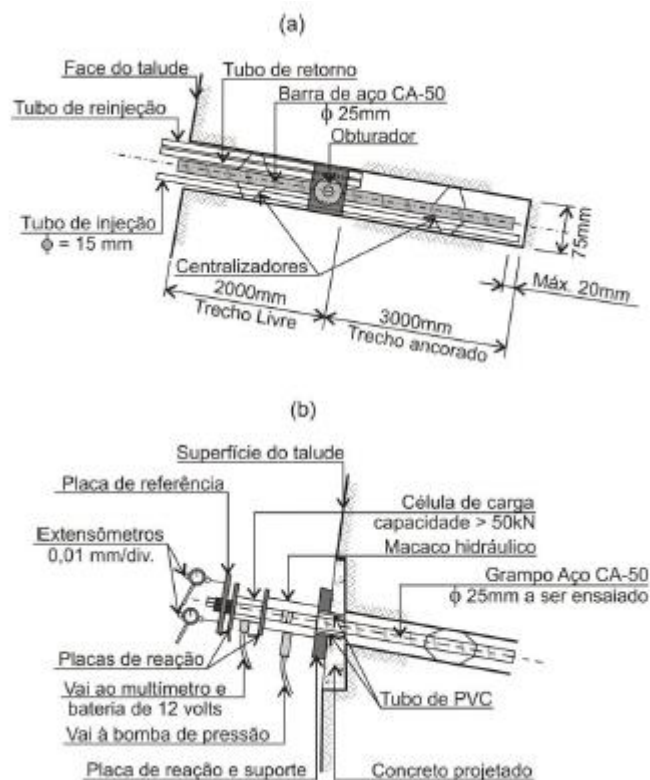


Figura 2.5: Ensaios de arrancamento: (a) montagem e injeção dos grampos e (b) sistema de aplicação de carga (Feijó; Ehrlich, 2001).

De acordo com Georio (2014) as barras ensaiadas devem ser superdimensionadas, para que o ensaio atinja a ruptura no contato solo grampo. Já Clouterre (1991) recomenda que os

grampos ensaiados tenham as mesmas características dos grampos da obra, como inclinação, injeção da nata de cimento e instalação da barra.

Com as medidas de carga e deslocamento, plota-se então uma curva carga x deslocamento, de onde se extrai o valor da tração máxima no grampo. Essa tração medida permite o cálculo da resistência ao arrancamento.

A paralisação do ensaio deve ocorrer quando a força de tração atingir o máximo ou estabilizar, conforme Figura 2.6 (Clouterre, 1991).

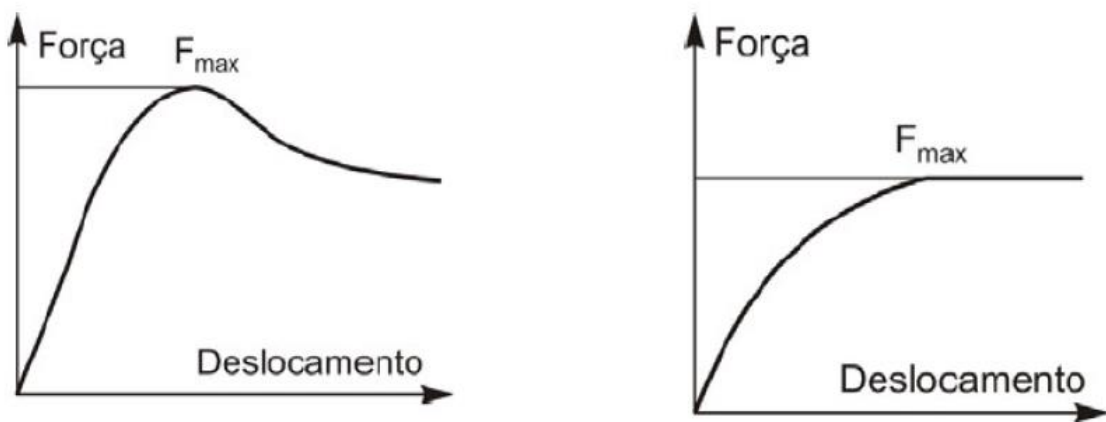


Figura 2.6:Paralisação do Ensaio de Arrancamento: Força Máxima e Estabilização da força (Modificado de Clouterre, 1991).

Deste modo, a resistência ao arrancamento é definida: pela equação (2.1):

$$q_s = \frac{T_{m\acute{a}x}}{L_p \pi D} \quad (2.1)$$

Onde: D é o diâmetro do furo; L_p é o comprimento do grampo envolvido pela calda de cimento; e $T_{m\acute{a}x}$ é a tensão máxima na barra definida pela equação (2.2):

$$T_{m\acute{a}x} = 0,9 \cdot \sigma_y \cdot A_s \quad (2.2)$$

Onde: σ_y é a tensão de escoamento do aço; e A_s é a área da seção transversal da barra.

2.4.2. Tensão nos grampos

A massa de solo é separada em duas: i) a zona ativa que se encontra entre a face da estrutura e a zona de ruptura, que é onde a massa de solo é instável e onde o grampo garante a estabilidade. ii) a zona passiva é a região onde os grampos são ancorados e fica atrás da superfície de ruptura.

As forças de atrito mobilizadas nos grampos vão para a direção da face na zona ativa e em direção à massa de solo na zona passiva. Ao longo do processo de escavação, vão surgindo descompressões laterais causando deformações internas na massa de solo reforçada que geram esforços axiais ao longo do grampo, modificando a distribuição das tensões nos grampos, como mostra a Figura 2.7 (Feijó, 2007).

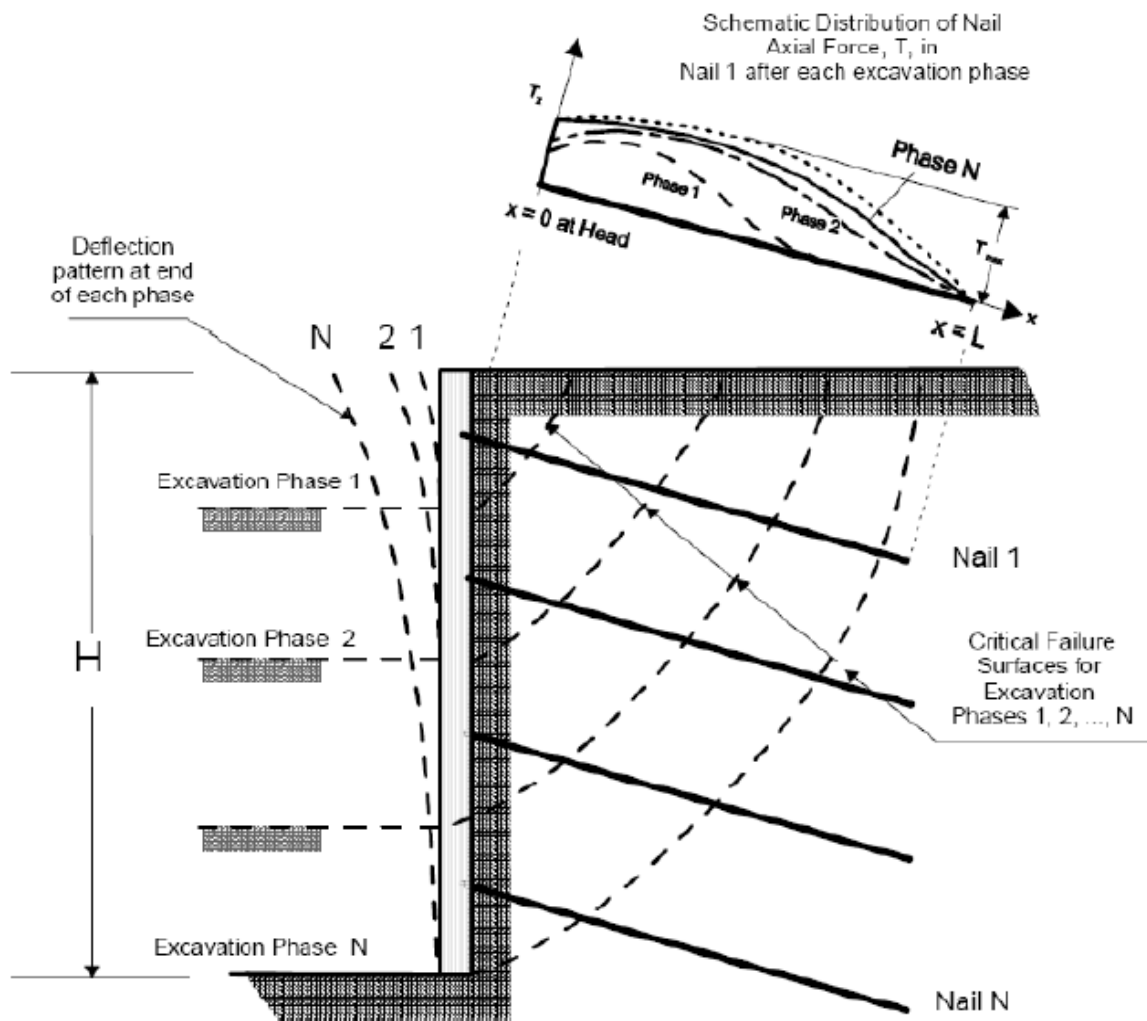


Figura 2.7: Distribuição das forças axiais e deslocamentos horizontais de uma escavação grampeada (Lazarte *et al.*, 2003 *apud* Silva, 2015).

Segundo Clouterre (1991), para o caso específico estudado a tensão nos grampos é mobilizada durante as três a quatro fases posteriores da escavação até que a tensão se estabilize. Com o progresso da escavação a tensão mobilizada vem da descompressão lateral e do efeito de arqueamento. Enquanto a estrutura de solo grampeada é construída, a distribuição da tensão ao longo dos grampos evolui. O primeiro experimento do projeto mostrou que a relação entre a tensão mobilizada no grampo e a tensão máxima ($T_0/T_{máx}$) era próxima de 100% no início do experimento e diminui gradativamente com as fases de escavação

chegando a variar de 30% a 70%. A Figura 2.8 mostra a distribuição das tensões de acordo com as fases de escavação.

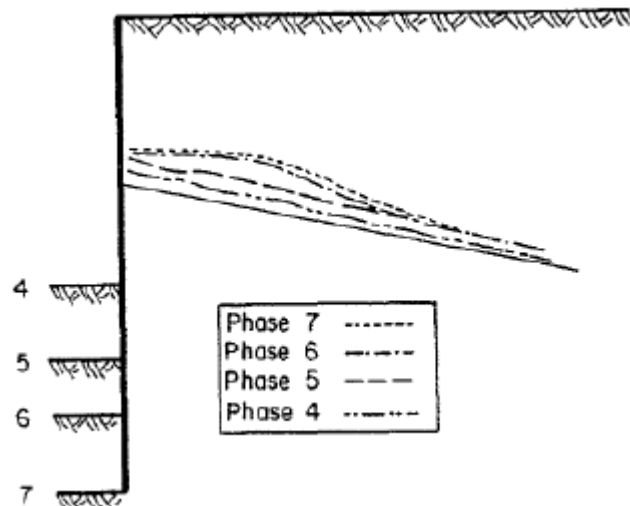


Figura 2.8: Evolução de $T_0/T_{máx}$ com avanço da escavação (Clouterre, 1991).

Eventualmente podem ocorrer outros esforços nos grampos. Podem surgir esforços cisalhantes e momentos fletores causados por solicitações transversais ao grampo. As magnitudes desses esforços estão relacionadas com a rigidez do grampo, concentração de elevadas deformações que ocorrem na vizinhança da superfície potencial de ruptura e orientação do grampo em relação à direção principal de maior deformação. No ponto onde a superfície potencial de ruptura intercepta o grampo, a máxima tensão cisalhante ocorre e o momento fletor é nulo. Enquanto que, as tensões de cisalhamento são nulas nos pontos onde os momentos fletores são máximos.

2.4.3. Rigidez nos grampos

Geralmente, os grampos usados para reforçar maciços de solo apresentam rigidez e diâmetro suficientes para resistir aos esforços de cisalhamento e flexão. Portanto, dependendo da sua inclinação com a horizontal, os grampos podem ser solicitados à tração, à flexão e ao cisalhamento. Assim, para que as deformações sejam limitadas e ocorra a eficiência máxima, a inclinação do grampo deve coincidir com a maior direção principal de deformação da massa

reforçada, ε_1 . Neste caso, o grampo é submetido somente ao esforço de tração. Porém, em análises convencionais, as contribuições da resistência à flexão e ao cisalhamento do grampo são comumente negligenciadas para grampeamento projetado com inclinação sub-horizontal de até 15° e sob a condição de fundo estável (Ehrlich, 2003).

Foi apresentado por Mitchell e Villet (1987) o efeito da rigidez dos reforços na tensão e deformação (Figura 2.9). Os reforços flexíveis se deformam até que se atinja o equilíbrio e a estabilização é promovida somente pela resistência à tração. Porém, os grampos mais rígidos podem ser submetidos a esforços de flexão e cisalhamento, além de esforços axiais. Elementos rígidos resistem às deformações e, conseqüentemente, há mobilização de empuxos passivos ao longo dos reforços de maneira oposta nas zonas passiva e ativa.

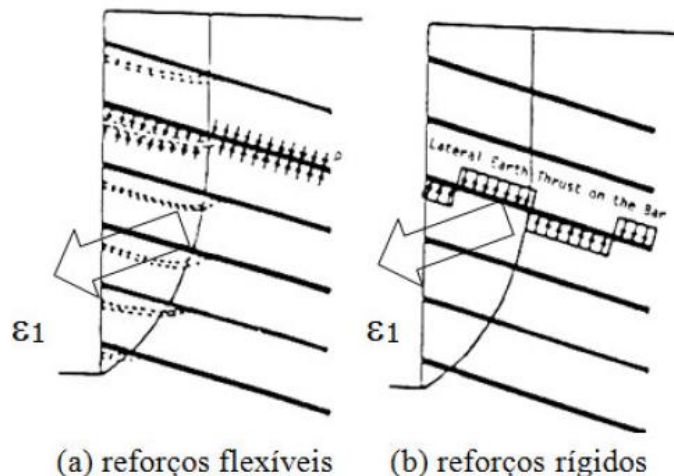


Figura 2.9: Efeito da rigidez dos reforços nas tensões e deformações mobilizadas: (a) reforços flexíveis e (b) reforços rígidos (Mitchell e Villet, 1987).

As movimentações relativas solo-reforço podem ser consideradas nulas sob condições de trabalho (Dyer e Milligan, 1984, Jewell, 1980 *apud* Ehrlich e Mitchel, 1994). Assim, não ocorrem deslizamentos no contato e as deformações no solo e no reforço nessa interface são as mesmas. Desse modo, as deformações que ocorrem no solo são controladas pela deformabilidade do grampo (Ehrlich, 2003).

É apresentado por Ehrlich (2003) um modelo de tensão-deformação para solo grampeado (Figura 2.10). Sob deformação lateral nula (ε), tem-se o solo na condição de repouso ($\sigma_s = \sigma_z \cdot K_0$). À medida que as deformações vão ocorrendo, as tensões no solo diminuem tendendo ao estado ativo. Já as tensões nos reforços crescem com as deformações, (ε). As deformações cessam quando o equilíbrio é satisfeito.

Desse modo, tem-se que grampos mais rígidos (S_i)₂ levam a menores movimentações e as tensões no solo e nos reforços são mais próximas as correspondentes ao repouso. Grampos mais deformáveis, (S_i)₁, permitem ao conjunto deformações suficientes para a plastificação da zona potencialmente instável e tem-se o solo nesta zona num estado de tensões mais próximo ao ativo. Nestas condições as tensões no grampo se apresentam mais baixas (Ehrlich, 2003).

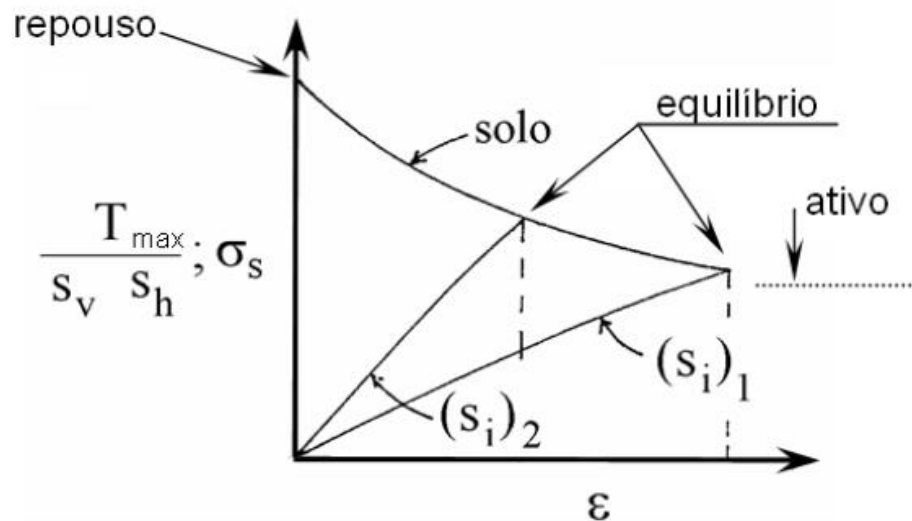


Figura 2.10: Influência da rigidez do grampo nas deformações e tensões mobilizadas (Ehrlich, 2003).

De acordo com Ehrlich e Mitchell (1994), S_i é o índice de rigidez relativa solo grampo definida pela equação (2.3).

$$S_i = \frac{A_r \cdot E_r}{k \cdot P_a \cdot S_v \cdot S_h} \quad (2.3)$$

Onde: A_r e E_r são a área e módulo de deformabilidade dos grampos, respectivamente;

K é o módulo tangente inicial no modelo hiperbólico de Duncan *et al.*(1980);

P_a é a pressão atmosférica (constante unitária);

S_v e S_h são os espaçamentos vertical e horizontal do grampo (definem a área de influência).

Ehrlich *et al.* (1996) e Lima (1996) elaboraram um estudo paramétrico, através de simulação numérica de uma escavação de solo grampeado. A modelagem foi realizada em etapas tal qual é o processo executivo. A inclinação (θ) dos grampos e da face e a rigidez dos grampos foram variadas para destacar a importância desses fatores no comportamento da estrutura. A Figura 2.11 apresenta os resultados encontrados com relação à influência do grampo.

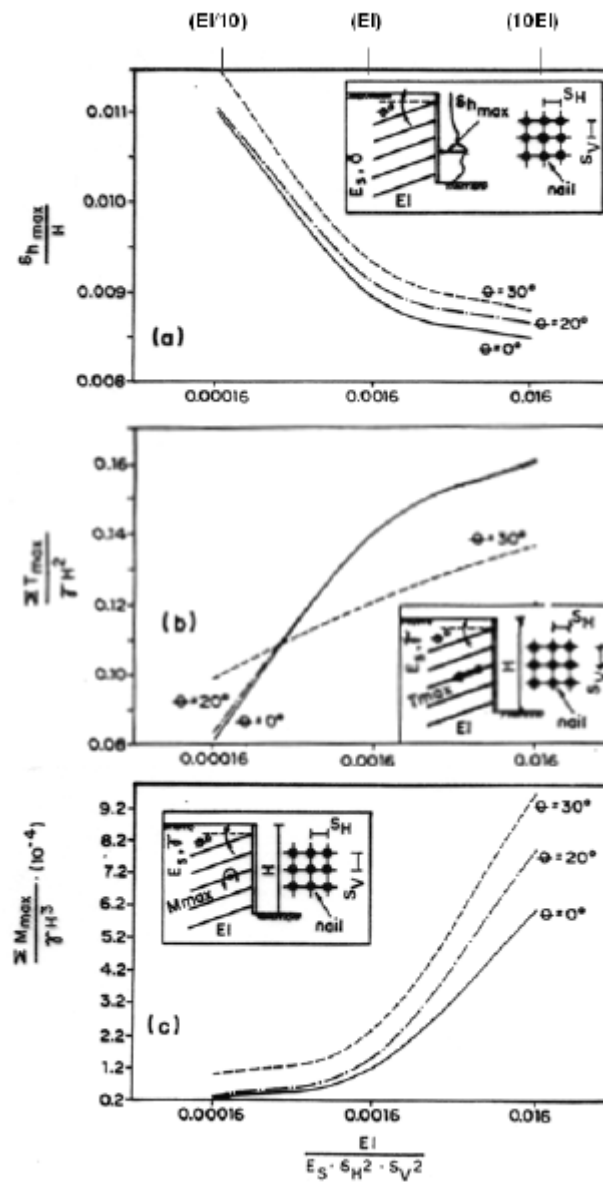


Figura 2.11: Influência da rigidez do grampo: (a) deslocamento horizontal da face; (b) força axial no grampo; e (c) momentos fletores (Ehrlich *et al.*, 1996).

Observa-se que, os grampos mais rígidos permitem menores movimentações da face e são verificadas maiores mobilizações da força axial e momentos fletores no grampo. A variação da inclinação do grampo de zero a 30° com a horizontal não foi um fator principal nas movimentações, ao contrário das tensões atuantes no grampo, que foram influenciadas pela inclinação (Ehrlich, 2003).

A modelagem numérica feita por Ehrlich *et al.* (1996) analisou a influência da rigidez e da orientação dos grampos na natureza dos esforços internos dos mesmos. Para grampos mais rígidos o aumento da inclinação gera redução dos esforços axiais.

2.4.4. Inclinação dos taludes grampeados

Como visto, a inclinação dos taludes grampeados influencia na atuação dos esforços nessas estruturas. Ehrlich (2003) diz que em taludes verticais o comprimento de transferência ao longo da interface solo-grampo na cunha ativa é pequeno e as tensões junto à face podem se apresentar mais elevadas próximo ao pé da escavação (Figura 2.12a). Nestas condições, podem ser necessárias faces estruturalmente resistentes. Já em taludes com inclinações suaves, existe um aumento do comprimento de transferência na cunha ativa e diminuição das tensões atuantes junto à face (Figura 2.12b). Assim, a estabilidade aumenta significativamente próxima a face e, então, o revestimento da face pode ser dispensado quanto ao aspecto estrutural.

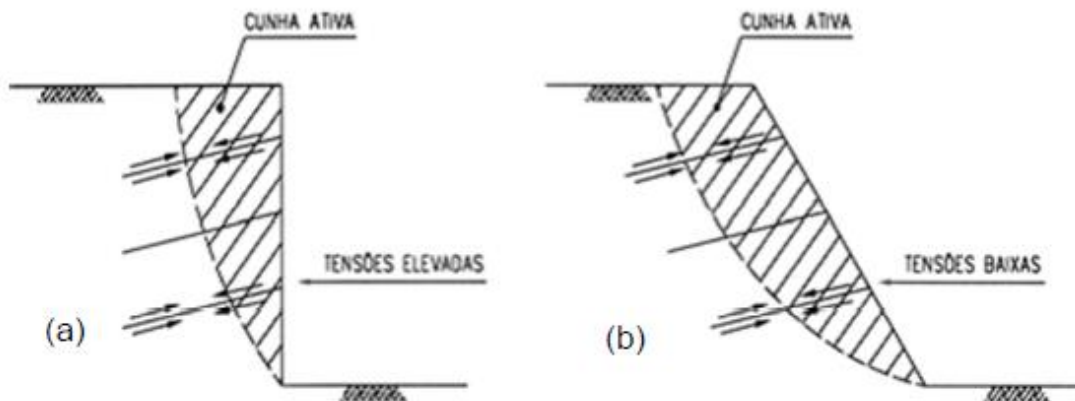


Figura 2.12: Importância da face: (a) Talude vertical; (b) Talude com inclinação suave (Ehrlich, 2003).

2.4.5. Estado de tensões nos solos grampeados

Segundo Clouterre, o estado de tensões no solo de uma estrutura de solo grampeado pode ser estimado a partir da definição dos esforços axiais máximos ocorridos em cada linha de grampo de uma seção. Seja a razão K definida pela equação (2.4).

$$K = \frac{T_{max} \cos \theta}{\gamma \cdot z \cdot S_v \cdot S_h} \quad (2.4)$$

Onde: $\gamma \cdot z$ é a tensão vertical no ponto de tração máxima;

S_v e S_h espaçamentos vertical e horizontal entre grampos; e

θ é o ângulo de instalação dos grampos em relação a horizontal.

Em obras monitoradas, modelos reduzidos e modelagens numéricas observa-se que, no topo da estrutura, o estado de tensões do maciço se aproxima da condição de repouso (K0). Enquanto que, na base da estrutura, o estado de tensões é inferior a condição ativa. Esta redução gradual do coeficiente K deve-se ao processo de escavação e ao efeito de arqueamento desenvolvido entre o topo e a base da estrutura. Este comportamento foi observado por Clouterre (1991), Cartier e Gigan (1983), e por Ehrlich e Silva (2015). A Figura 2.13 apresenta os resultados de monitoramentos e modelagem numérica.

A tensão vertical no ponto de tração máxima ($\gamma \cdot z$) pode ser um pouco maior que o produto do peso específico aparente natural do solo (γ) vezes a profundidade considerada devido ao fenômeno da dilatância que pode ocorrer, conduzindo a valores de tensão vertical maiores que os calculados.

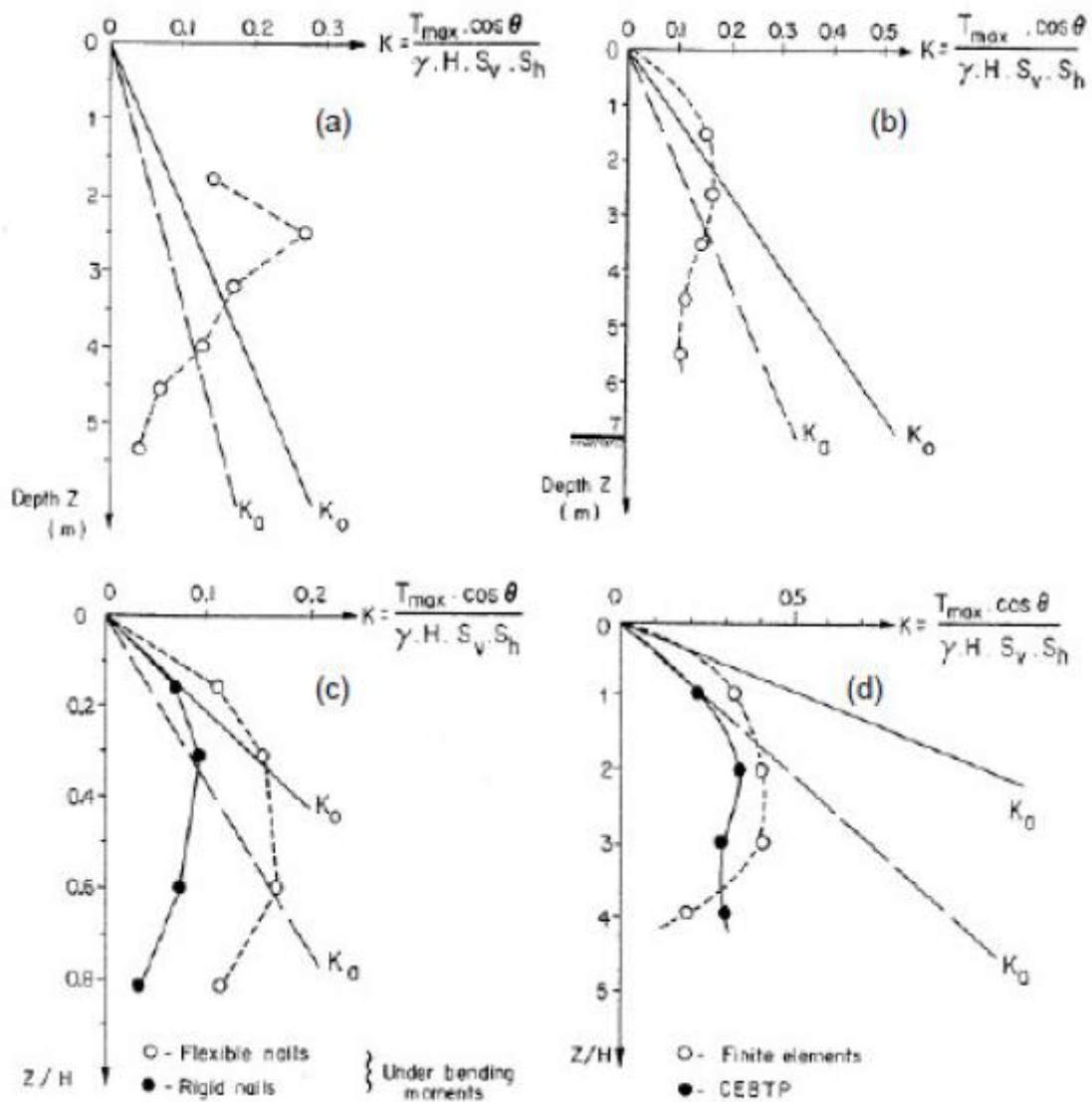


Figura 2.13: Estado de tensões no solo de um estrutura grampeada, comparação entre as condições de repouso (K_0) e ativa (K_a): (a) e (b) obras monitoradas (Cartier e Gigan, 1983 e Clouterre, 1991); (c) monitoração de modelos em escala reduzida (Clouterre, 1991) e (d) modelagem numérica (Clouterre, 1991).

2.4.6. Deslocamentos e deformações nos solos grampeados

Em estruturas de solo grampeado, a mobilização dos grampos depende diretamente do modo de deformação do sistema solo-reforço. Os vários experimentos realizados pelo projeto Clouterre (1991) foram de grande importância para o entendimento da ordem de grandeza das deformações e deslocamentos que ocorrem nas estruturas de solo grampeado. Os deslocamentos são máximos no topo da face conforme apresentado na Figura 2.14, onde $\delta_0 =$

deslocamento horizontal máximo na superfície atrás do bloco; δ_h =deslocamento horizontal máximo no topo da escavação próximo à face e δ_v =deslocamento vertical máximo no topo da escavação próximo à face.

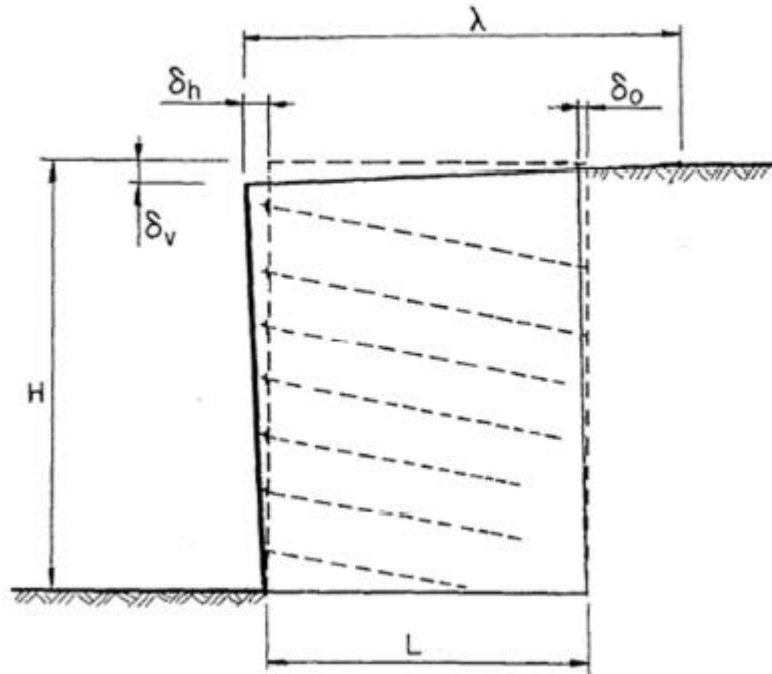


Figura 2.14: Deformações no solo grampeado (Clouterre, 1991).

De acordo com os resultados obtidos pelo projeto Clouterre (1991), os deslocamentos horizontais δ_h e verticais δ_v na crista do faceamento possuem a mesma ordem de grandeza, sob a condição de trabalho e próximo à ruptura (Figura 2.15). Deslocamentos observados atrás da massa reforçada mostram que há uma pequena distorção da massa de solo grampeada.

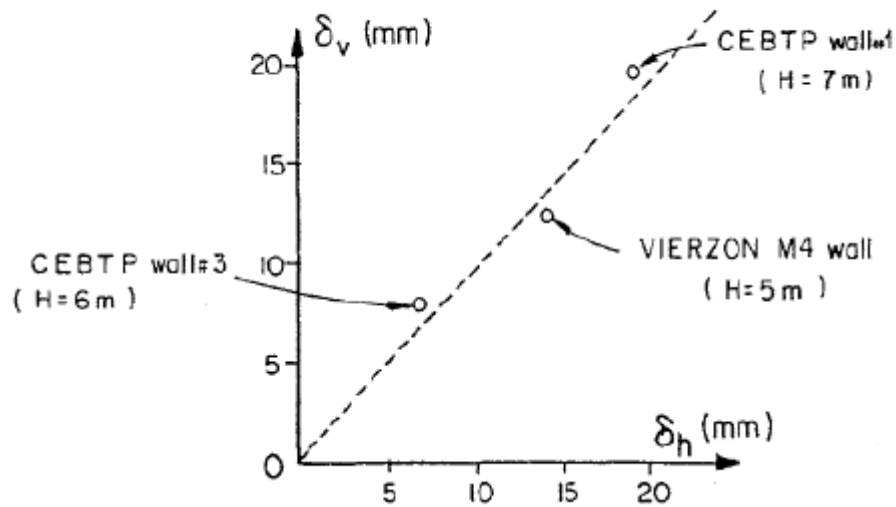


Figura 2.15: Relação entre deslocamentos medidos no topo da face de estrutura de solo grampeado (Clouterre, 1991).

Lima (2002) destaca alguns parâmetros que influenciam nos deslocamentos no topo da face da escavação. Destaca-se: i) velocidade da construção da estrutura; ii) altura dos incrementos de escavações e espaçamento entre grampos; iii) comprimento dos grampos; iv) fator de segurança global (quando o FS da estrutura é baixo, os deslocamentos são altos); v) relação comprimento/altura; vi) inclinação dos grampos e rigidez a flexão; vii) capacidade de suporte do solo de fundação; viii) inclinação da face.

2.4.7. Faceamento do solo grampeado

O faceamento dos solos grampeados, segundo Ehrlich (2003), tem função secundária na estabilização, sendo necessário, basicamente, para evitar rupturas localizadas. Como visto no item sobre inclinação dos taludes grampeados, em taludes com inclinações mais suaves podem ser dispensadas o revestimento da face no aspecto estrutural. Neste caso, pode-se adotar cobertura vegetal sem prejuízos à estabilidade e sua função principal é garantir o controle dos processos erosivos.

Ehrlich (2003) também discute a influência da rigidez da face nos esforços desenvolvidos nos grampos e nas movimentações do maciço. De acordo com os resultados de análises numéricas, (Figura 2.16) verifica-se que a rigidez da face não influencia as forças

axiais geradas nos grampos e nas movimentações da face. Porém, ao se desconsiderar a rigidez da face, um aumento nas movimentações devido a deformações localizadas nas regiões entre os grampos foi verificado. Observa-se na Figura 2.16c que houve um aumento considerável dos momentos fletores em função da redução da rigidez do faceamento. Este fato já era esperado, visto que, com alta rigidez a face passa a limitar os movimentos verticais, atuando como um apoio para a extremidade dos grampos.

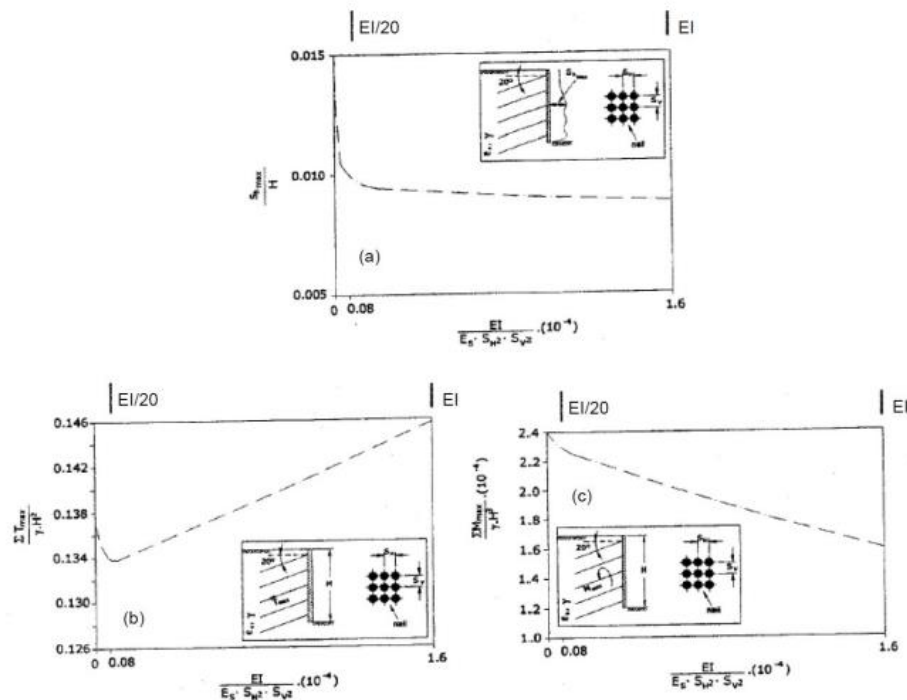


Figura 2.16: Influência da rigidez da face: (a) deslocamento horizontal da face; (b) força axial no grampo; e (c) momentos fletores (Ehrlich *et al.*, 1996).

2.4.8. Tipos de ruptura em solos grampeados

Os mecanismos de colapso nas estruturas de solo grampeado são classificados como ruptura externa, interna e mista (uma ação combinada das duas). A Figura 2.17 apresenta estes mecanismos. A ruptura externa refere-se a uma superfície de ruptura que se desenvolve fora da massa de solo grampeada, ou seja, a superfície de ruptura passa abaixo da estrutura de contenção. A ruptura interna ocorre na massa de solo reforçada. Este tipo de ruptura pode ser desenvolvido na zona passiva, na zona ativa ou nas duas zonas simultaneamente.

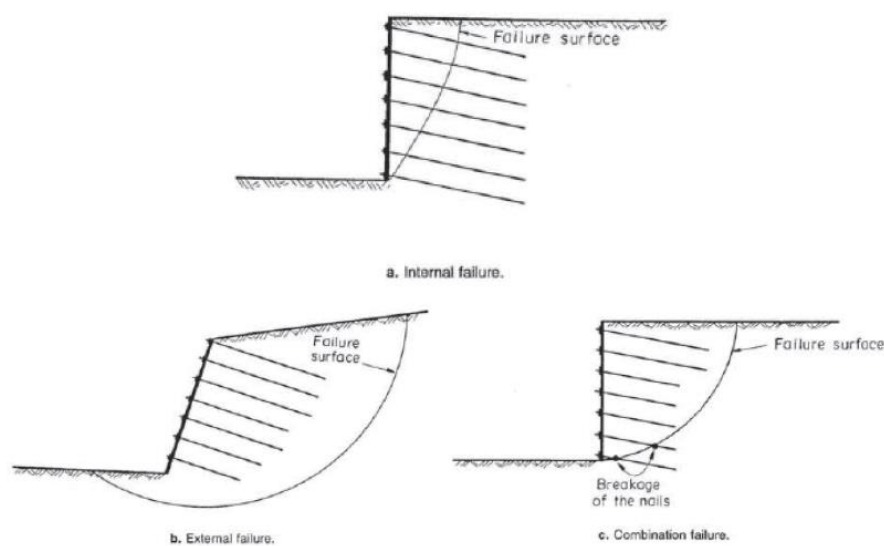


Figura 2.17: Tipos de ruptura que podem ocorrer nas estruturas de solo grampeado. a) interna; b) externa; e c) mista (Clouterre, 1991).

O mecanismo de instabilidade interna da estrutura de solo grampeado (o colapso) pode ocorrer por vários fatores, como, pelo arrancamento dos grampos ou uma ruptura de algum dos elementos de reforço. De acordo com Ehrlich e Silva (1992), a superfície potencial de ruptura e os pontos de tração máxima no grampo coincidem. Portanto, este fator é importante na ruptura da estrutura.

O colapso da estrutura promovido pela ruptura dos grampos pode estar relacionado a diferentes fatores como: (i) seção do grampo inadequada; (ii) corrosão das barras de aço dos grampos (Guilloux E Jailloux, 1979); (iii) sobrecargas não consideradas no projeto (Stocker *et al.*, 1979) e (iv) saturação ou aumento do teor de umidade do maciço reforçado (Clouterre, 1991).

Clouterre (1991) observou a ruptura dos grampos devido a redução gradativa da coesão aparente do solo saturado. O resultado da monitoração das deformações e esforços atuantes nos grampos é apresentado na Figura 2.18.

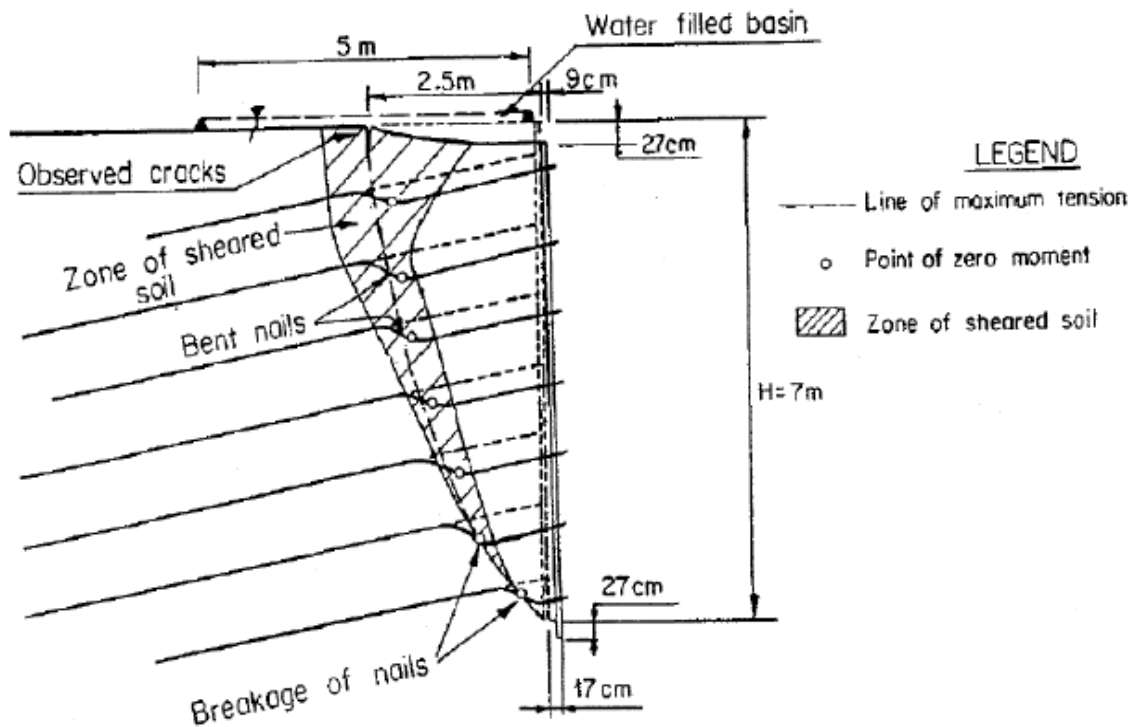


Figura 2.18: Construção de estrutura grampeada próxima ao fator de segurança unitário com redução da coesão aparente até a ruptura (Clouterre, 1991).

Segundo Clouterre (1991), quando os elementos de reforço não tem comprimento suficiente na zona passiva, de maneira que venha a equilibrar as tensões máximas, a ruptura por arrancamento dos grampos ocorre. A baixa resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo na zona passiva pode ocorrer devido a vários fatores, como por exemplo, o aumento do teor de umidade ou mesmo falhas no processo executivo da obra. Neste caso, a resistência ao arrancamento (q_s) do solo é baixa e o grampo é arrancado do solo. Este tipo de ruptura não ocorre, em geral, repentinamente, exceto em alguns casos durante a construção e quando deformações elevadas são desenvolvidas. Clouterre (1991) relata o caso de um solo grampeado constituído de solo argiloso, (eparriswall, 1980) que colapsou devido á redução da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo causada pela diminuição da sucção do solo causada por fortes chuvas. A Figura 2.19 apresenta o perfil de deslocamentos ocorridos da estrutura após a ruptura.

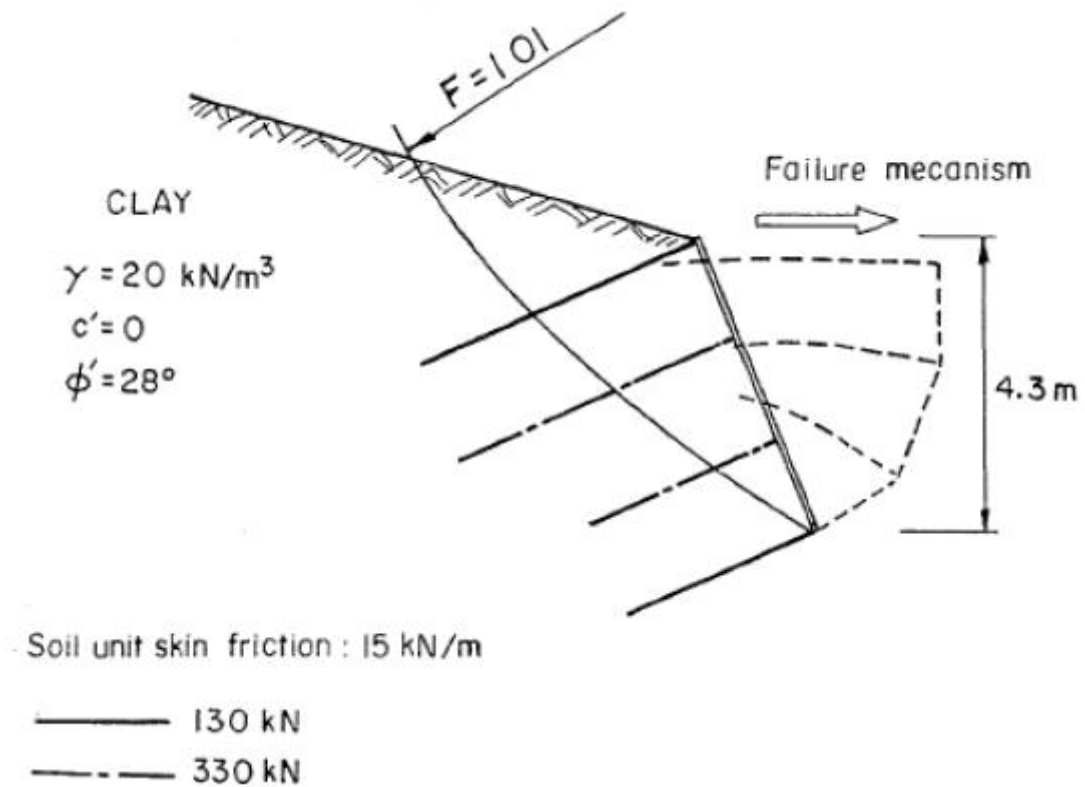


Figura 2.19: Forma deformada do solo grampeado Eparris Wall (1980) após a ruptura por arrancamento dos grampos (Clouterre, 1991).

Clouterre (1991) apresentou um terceiro experimento que estudou o caso em que grampos muito curtos causaram um tipo de ruptura. Para isso, construiu-se uma parede de solo grampeado de 6 m de altura e gradualmente reduziu-se o comprimento de seus grampos até levá-la à ruptura. Na ruptura a estrutura abateu-se cerca de 30 cm e sofreu um deslizamento em uma superfície bem definida. Esta superfície é a superfície limite entre a ruptura interna e externa e a ruptura por arrancamento dos grampos (Figura 2.20).

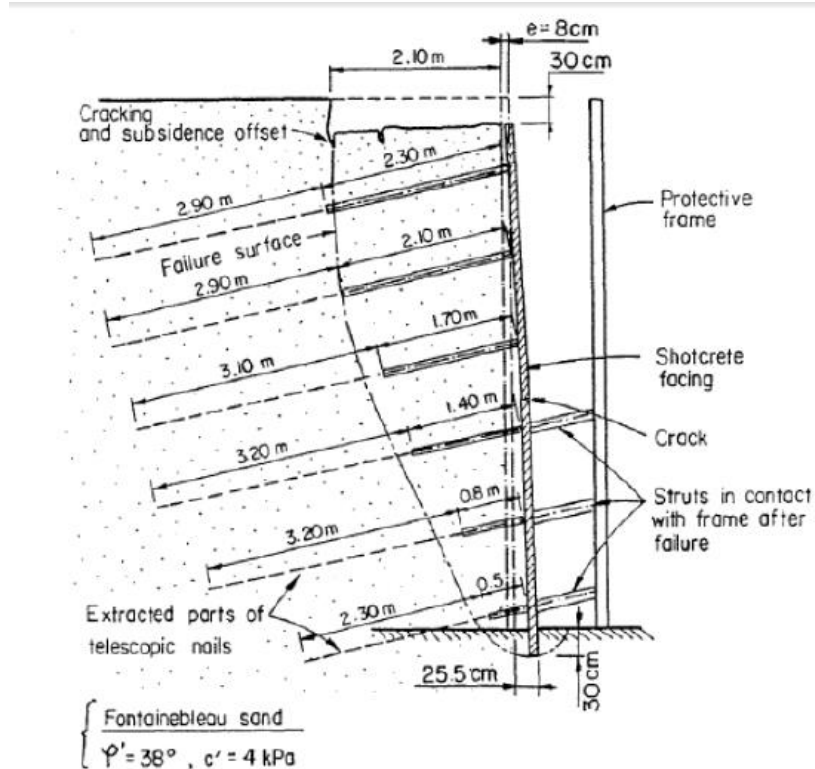


Figura 2.20: Ruptura induzida através da redução gradual do comprimento dos grampos (Clouterre, 1991).

2.5. Comparação com outras técnicas

2.5.2. Solo grampeado *versus* muro de solo reforçado

Entre essas duas técnicas é possível notar similaridades. Por exemplo, nos dois métodos o principal agente estabilizador é a resistência ao cisalhamento que é desenvolvida no contato solo-reforço. Porém, há algumas diferenças. No solo grampeado a estrutura inicia-se por escavações de cima para baixo. Já no muro de solo reforçado a estrutura é construída em camadas de cima para baixo. Isso leva a diferenças no desenvolvimento de deslocamentos e deformações.

No solo grampeado, o solo sofre descompressão lateral e recalques. Então, no fim da obra, há desaprumo da face e os deslocamentos verticais e horizontais são máximos no topo. Nos muros de solo reforçado mal compactados, os deslocamentos tendem a aumentar na base durante as fases de construção do aterro, levando, durante o processo construtivo, a ocorrência

de pequenas deformações na base, onde os deslocamentos horizontais vão se tornar máximos. Já nos muros bem compactados há deformações que causam desalinhamento na face, sendo máximo no topo (Figura 2.21) (Ehrlich, 1996).

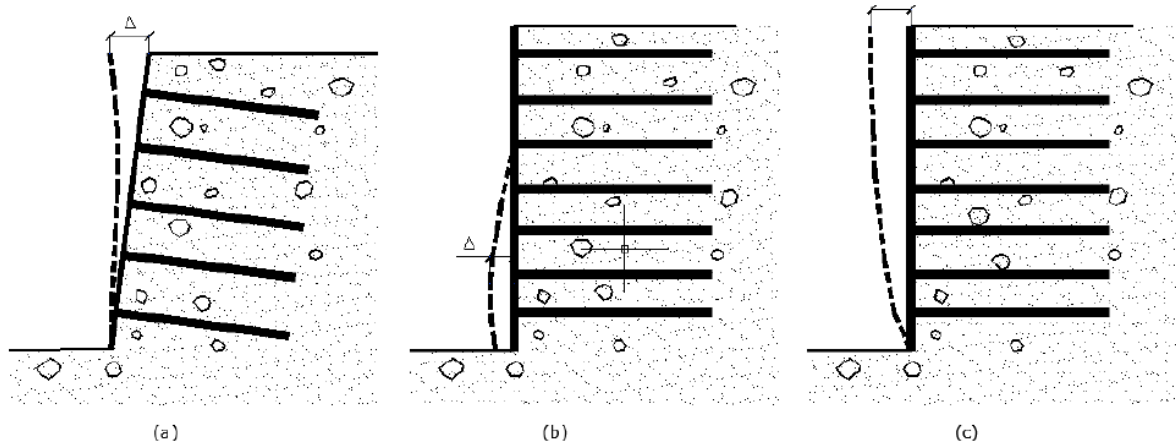


Figura 2.21: Comparação entre deslocamentos horizontais máximos: (a) solo grampeado e; muros de solos reforçados (b) mal compactados ou de grande altura e (c) bem compactados.

Observando-se a rigidez dos reforços, os grampos resistem a esforços de tração e momentos fletores. Já em de muros de solo reforçado os reforços são tiras ou grelhas altamente flexíveis, resistindo somente à tração. (Schlosser *et al.*,1982).

Porém as duas técnicas também possuem alguns pontos em comum, como, a instalação dos reforços sem tensão, sendo mobilizados somente quando há deformações no solo; O atrito lateral desenvolvem forças nos reforços na interface solo-reforço; O revestimento da face não tem função estrutural importante nas duas técnicas; quanto aos esforços dinâmicos há bom comportamento em ambas; Observa-se também que em ambos os sistemas de contenção a rigidez relativa solo-reforço (S_i) é um dos principais parâmetros que vai controlar a tração nos reforços e as deformações.

2.5.3. Solo grampeado versus cortina atirantada

Embora os resultados da estabilização sejam semelhantes, e o processo executivo seja do topo para a base em ambas as técnicas, elas possuem muitas diferenças.

Os tirantes interferem no estado de tensões do solo devido à ocorrência de tensão nos mesmos, gerada pela protensão. A protensão também diminui as deformações e distribui forças de magnitudes, sentidos e direções definidos por toda a área de contato sobre a face.

Já no solo grampeado, os grampos não interferem no estado de tensões iniciais do solo, pois eles não sofrem tensão até que haja deslocamento no solo. A estabilização vem do atrito gerado pela interface solo-reforço, mobilizada somente quando há deformação no solo. Então, como é preciso ocorrer deformações no solo para mobilizar a resistência ao cisalhamento do grampo, as estruturas de solo grampeado possuem maior deformabilidade que a cortina atirantada (Ehrlich, 2003).

Para mesmas condições de projeto, o número de grampos utilizado será maior que o número de tirantes, o que permite concluir que a ruptura em um grampo tem um efeito menor na estabilidade do que a ruptura em um tirante. As faces das duas estruturas também possuem funções distintas. Enquanto a face em solos grampeados é necessária somente para garantir a estabilidade global e evitar a erosão, a face em cortinas atirantadas promove a estabilidade da zona potencialmente instável (Ehrlich, 2003).

Nos tirantes, ao longo do comprimento, uma parte fica livre e a outra ancorada, sendo a distribuição de tensões no trecho livre aproximadamente constante e no trecho ancorado variável. Por outro lado, nos grampos as tensões são variáveis em todo comprimento. A Figura 2.22 mostra diferenças entre a cortina atirantada e o solo grampeado.

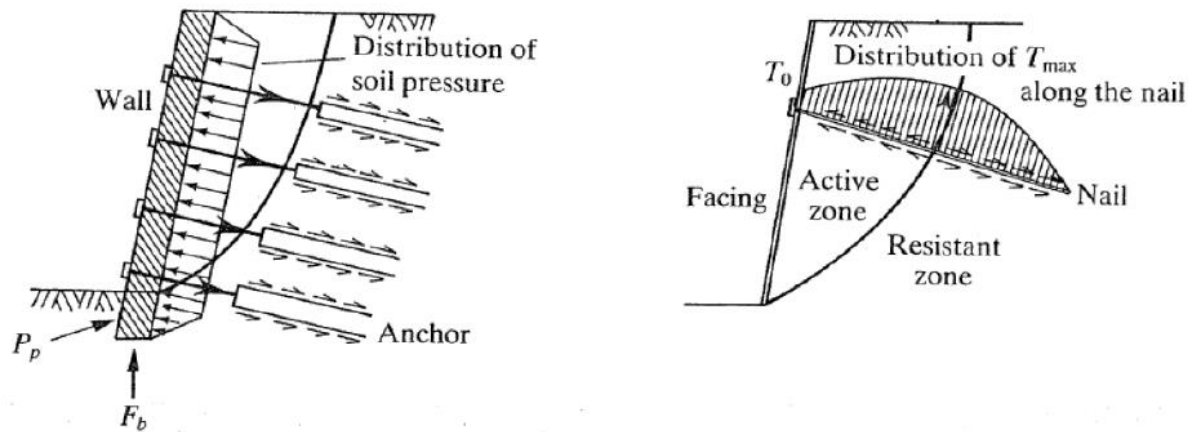


Figura 2.22: Comparação entre as técnicas de estabilização solo grampeado x cortina ancorada (Mitchell; Villet,1987).

A norma ABNT NBR 5629 (2006) regulamenta a execução, controle dos ensaios e aceitação dos tirantes para cortina atirantada, o que aumenta a confiabilidade nos resultados. Para os grampos, ainda não existe norma específica. Na prática é feito ensaio de arrancamento nos grampos.

O custo de uma obra em solo grampeado é menor do que em cortina atirantada, isso porque não há necessidade de uma face muito resistente e os equipamentos utilizados para a construção são mais leves. Além disso, o prazo para uma obra de solo grampeado é menor devido ao fato de não ser necessário esperar a cura do concreto (cortina ou grelha) para que o grampo comece a trabalhar como elemento de estabilização.

2.6. Vantagens e desvantagens da técnica

Para utilizar esta técnica em um processo de estabilização é necessário conhecer as vantagens e desvantagens para que a escolha seja bem feita.

Como vantagens para o uso de solo grampeado, podem-se citar:

- Uso de equipamentos leves e de fácil manuseio. Não é necessário fundação para a estrutura, os furos são feitos por sondas rotativas de pequeno porte e a injeção da calda de cimento ocorre por gravidade.

- Rápida execução da estrutura. Como há um avanço simultâneo da construção da estrutura, nas etapas de escavação grampeamento e revestimento, a técnica mostra uma maior agilidade. Logo, é uma solução de custo baixo, porque é simples, rápida e usa equipamentos de pequeno porte.
- Permite que haja alterações no projeto durante a fase de construção. Portanto, é adaptável e flexível às condições do local. Podem ser alterados, por exemplo, o espaçamento e comprimento dos grampos e a profundidade de escavação.
- Por ser uma estrutura deformável, essa estrutura suporta com segurança recalques totais e diferenciais. Sendo, portanto, uma estrutura de bom desempenho (Mitchell; Villet, 1987).

Como desvantagens para o uso de solo grampeado, podem-se citar:

- Dificuldade de execução abaixo do nível d'água, pois escavações abaixo do nível d'água podem gerar instabilidades locais que dificultam a execução da face. Além disso, a resistência ao cisalhamento no contato entre solo e o grampo diminui com a percolação da água no solo, sendo possível que a estrutura vá ao colapso.
- Altos deslocamentos horizontais e verticais. Isso leva a tomada de cuidados especiais em obras próximas a estruturas que não admitem movimentação do terreno. Neste caso, podem ser usados alguns grampos com ancoragens, que diminuem as deformações, como mostra a Figura 2.23 (Feijó e Ehrlich, 2005).

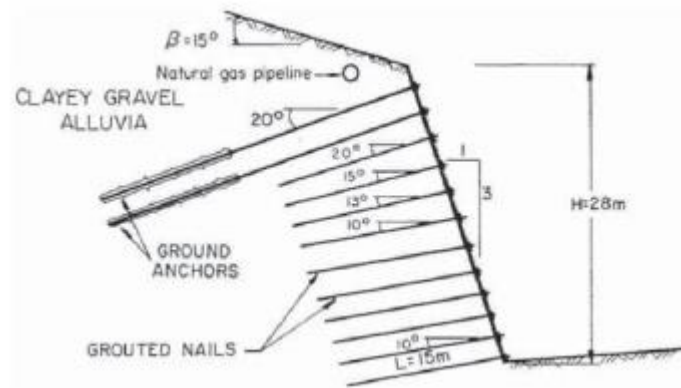


Figura 2.23: Estabilização do talude com contenção mista para minimizar os deslocamentos em função do gasoduto (Clouterre,1991).

2.7. Estimativa do módulo de elasticidade do solo.

Sandroni (1991) *apud* Veloso & Lopes (1996) compilou alguns resultados de provas de cargas em solos frequentemente encontrados no Brasil, os solos residuais de gnaise, para que fossem obtidos os módulos de elasticidade destes solos. Então, foi encontrada uma relação entre o módulo de elasticidade do solo e o N_{spt} do mesmo, conforme apresenta Figura 2.24.

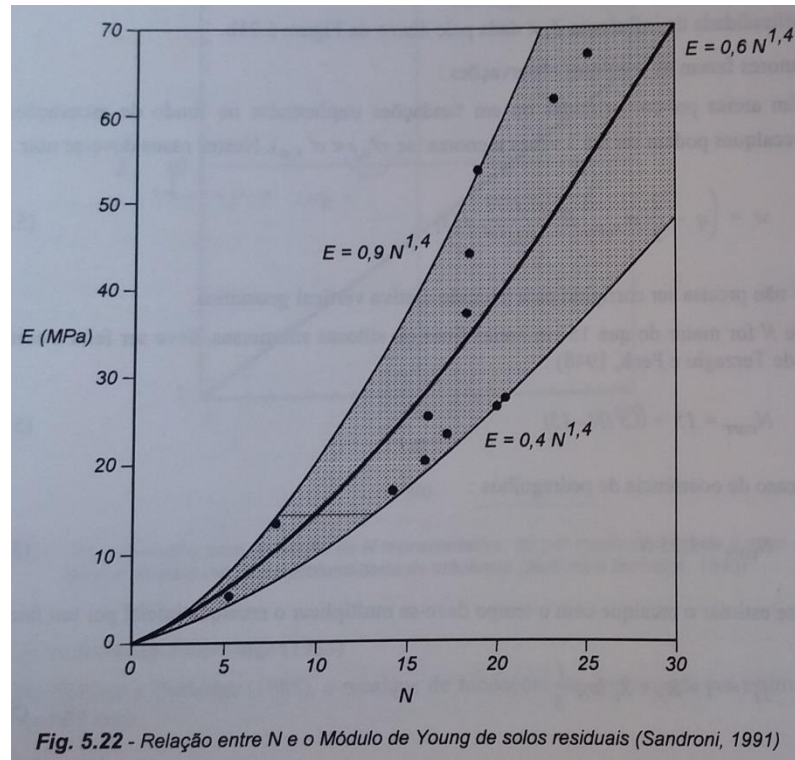


Figura 2.24: Relação entre N e o módulo de Young de solos residuais (Sandroni, 1991).

2.8. Métodos de análise: equilíbrio limite e método numérico.

Rawat e Gupta (2016) compararam dois métodos de análise muito utilizados para análise de estabilidade de taludes: o método do equilíbrio limite e o método dos elementos finitos. O método do equilíbrio limite baseia-se no conceito de dividir a massa em fatias, com certos pressupostos sobre a distribuição da força para calcular o fator de segurança. Os pressupostos são geralmente focados na inclinação ou localização das forças entre as “fatias” e uma superfície de deslizamento pré-escolhida de uma geometria assumida, como log-espiral, cunha e circular.

Já o método dos elementos finitos é usado também para obter a solução ideal de limite superior para estruturas e problemas geotécnicos. A modelagem numérica de encostas reforçadas por método de elementos finitos mostrou-se muito útil na previsão de deformação

e análise de tensão, resistência à retirada dos grampos forças no grampo ao longo do comprimento, variações de força de grampos com coesão, ângulo de atrito e movimento lateral da inclinação. O fator de segurança no método dos elementos finitos é possível utilizando o método de redução de força. A análise deste método é feita através da redução dos parâmetros de resistência (c e ϕ) enquanto as cargas devido ao peso do solo e outras cargas externas são aplicadas até o sistema não conseguir manter uma condição estável.

No estudo foram feitas variações nas declividades dos taludes reforçados com grampos (45° e 60°) e também variou a inclinação dos grampos (0° , 15° e 30°). Concluiu-se que, o método do equilíbrio limite prevê um fator de segurança mais elevado do que o método dos elementos finitos. A estabilidade dos taludes não aumenta com o aumento da inclinação dos grampos. Em ambos os métodos as superfícies de deslizamento passa de circular para não circular à medida que o ângulo de inclinação fica mais acentuado. A superfície de deslizamento mais crítica se encontra a uma distancia maior da face no método do equilíbrio limite comparada ao método dos elementos finitos. Ambos os métodos preveem as condições limitantes. A interseção da superfície de falha com o comprimento dos grampos governa qual condição eles foram mobilizados. Os resultados do método do equilíbrio limite dependem do comprimento do grampo. Os taludes com grampos mais compridos são mais estáveis. Já os resultados do método dos elementos finitos independem do comprimento dos grampos, para o caso em que a resistência ao arrancamento tenha um valor muito alto. A análise do método dos elementos finitos mostra a variação do fator de segurança, porém esse aspecto não é previsto no método do equilíbrio limite.

O método do equilíbrio limite é um método de cálculo que faz o equilíbrio de forças e busca uma superfície onde o fator de segurança é o menor possível. Ou seja, o método supõe que no caso de falha, as forças atuantes se igualam ou são maiores que as forças resistentes.

Dentro do método do equilíbrio limite há alguns métodos de análise de estabilidade de taludes, entre eles está o método de bishop simplificado, utilizado para cálculo de estabilidade, que consiste basicamente em considerar a resultante das forças atuantes nas laterais das fatias em forças horizontais, ou seja, consideram-se nulas as forças cisalhantes nas laterais das fatias, conforme mostra a Figura 2.25.

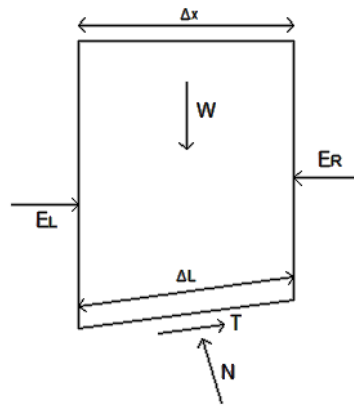


Figura 2.25: Representação das forças em uma fatia no método de Bishop simplificado (Silva, 2013).

O fator de segurança pode ser dado pela equação (2.5):

$$FS = \frac{\sum [c' \Delta x + (w - u \Delta x) \tan \varphi'] \left[1 / (\cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi'}{FS} \right]) \right]}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \quad (2.5)$$

Devido à presença da incógnita FS nos dois membros da equação (2.5, um processo iterativo para a obtenção do fator de segurança se torna necessário, sendo este geralmente de convergência rápida.

3. Materiais e métodos

No presente trabalho foram modeladas estruturas de solo grampeado com alturas de 6, 7.5 e 9 metros. Foram considerados casos com e sem o uso de grampos verticais. Foram efetuadas variações nos espaçamentos dos grampos sub-horizontais e verticais. Também fez variação na quantidade de grampos verticais situados (em uma seção) atrás da face, sendo considerados de 2 a 4 grampos. Primeiramente, escolheu-se uma estrutura padrão e as análises devem ser feitas a partir de variações desta estrutura. Para modelar as estruturas utilizaram-se três métodos. Iniciaram-se as modelagens, começando por um método mais simples (método do equilíbrio limite) e avançando para um método mais complexo de modelagem (método dos elementos finitos). No método dos elementos finitos as modelagens foram efetuadas nos ambientes 2D e 3D, utilizando-se o programa PLAXIS. Na modelagem no ambiente 2D foram utilizadas duas abordagens para a representação dos grampos: inicialmente se utilizou o elemento GEOGRID (considera apenas a rigidez axial do grampo) e depois foi utilizado o elemento PLATE (considera a rigidez axial e flexural do grampo). Neste capítulo são apresentados os principais passos utilizados nas modelagens e o programa de análises. O termo grampo utilizado neste capítulo compreende o conjunto barra-calda de cimento envolvente.

3.1. Modelagem pelo método do equilíbrio limite

3.1.1. Geometria

Para o método do equilíbrio limite foi utilizado o software *Slide*. Na interface do programa foi desenhada a geometria do maciço. A representação foi de 15 metros de comprimento e 12,5 metros de profundidade. Foram utilizados cinco grampos com inclinação de 15° e comprimento de 6 metros inseridos na escavação que possui 5 metros de comprimento e 7,5 metros de profundidade, como mostra a Figura 3.1. Os grampos foram inseridos à meia altura de cada etapa de escavação (0,75 m), sendo que o espaçamento vertical entre eles foi de 1,5 metros. Esta estrutura será denominada estrutura padrão e será utilizada também nos modelos numéricos 2D e 3D.

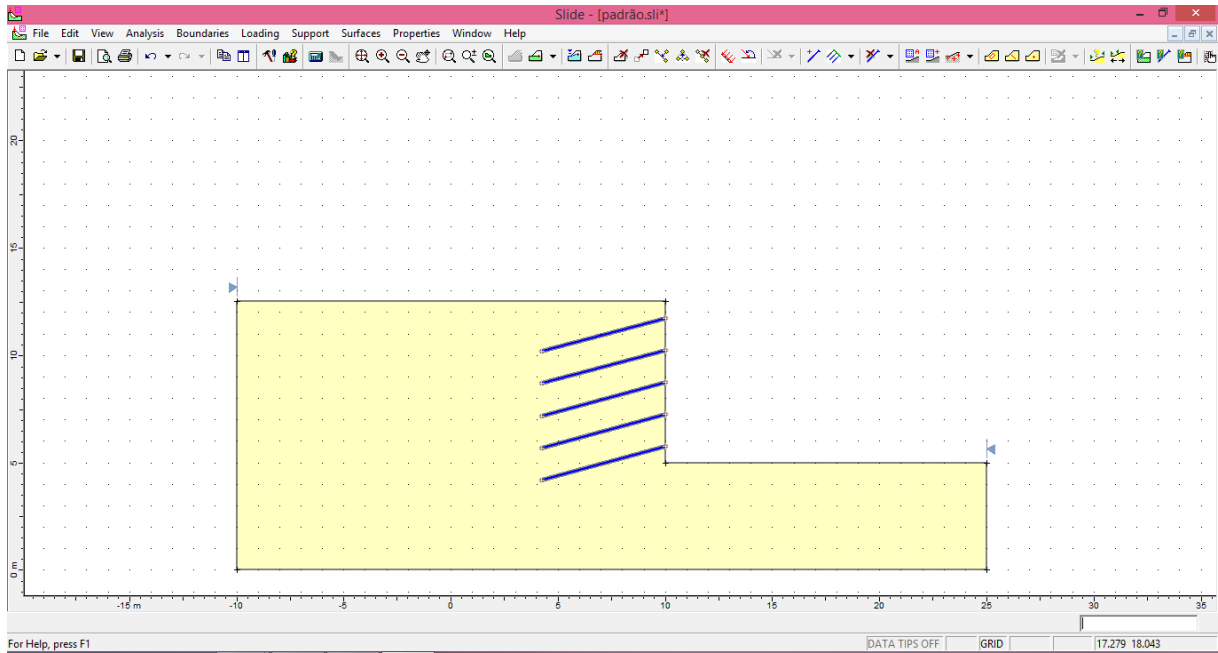


Figura 3.1: Geometria padrão no software *slide*

3.1.2. Propriedades dos materiais

Os parâmetros adotados para o solo e o modelo construtivo são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: propriedades do solo e modelo construtivo

Solo	
Propriedades	
Modelo	Mohr-Coulomb
γ_{unsat} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20
C (kN/m ²)	10,0
ϕ	35,0

Para os grampos foram adotadas propriedades iguais entre os grampos verticais e horizontais. O espaçamento horizontal dos grampos horizontais foi mantido constante e variou-se o espaçamento horizontal dos grampos verticais posteriormente. Para a estrutura padrão foi necessário o uso somente dos grampos horizontais. As propriedades utilizadas são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades dos grampos horizontais e espaçamento horizontal.

Grampos	
Propriedades Gerais	
Espaçamento horizontal (m)	2
Carga de trabalho (kN)	500
Força de arrancamento (kN/m)	157

Para a resistência ao arrancamento q_s foi adotado o valor de 500 kN/m². Adotou-se este valor considerado alto, para que, durante as análises, não ocorresse o risco de haver arrancamento, já que este não é um objetivo de análise. Portanto, como foi adotada uma resistência ao arrancamento (q_s) de 500 kN/m², o diâmetro do grampo (D) vale 0,1 m e o comprimento (L) é unitário, a força de arrancamento (F_{arr}) utilizada foi de 157 kN/m, calculada conforme equação (3.1).

$$q_s = \frac{F_{arr}}{\pi DL} \quad (3.1)$$

Ressalta-se que as barras adotadas para o grampo possuem diâmetro nominal de 36 mm. Portanto, de acordo com a Tabela 3.3, a carga de trabalho das barras é de 50 tf (500 kN). Este valor foi obtido no catálogo de barras da fabricante Dywidag. A inclinação dos grampos adotada foi de 15° para todos os modelos.

Tabela 3.3: Cargas de Trabalho para Ancoragens no Terreno (Protendidos Dywidag Ltda, 2017)

ϕ Nominal	Tirantes permanentes (tf)	Tirantes Provisórios (tf)	Carga Máxima de Ensaio (tf)
DW 15 mm	8	10	14
DW 32 mm	39	46	68
DW 36 mm	50	58	87
DW 40 mm	61	71	107
Dw 47 mm	85	99	148

Para as análises com os grampos verticais (Figura 3.2), as propriedades utilizadas foram as mesmas, variando-se somente o espaçamento horizontal em algumas análises. Não

foi considerada a presença de nível d'água nas estruturas modeladas pelo método do equilíbrio limite.

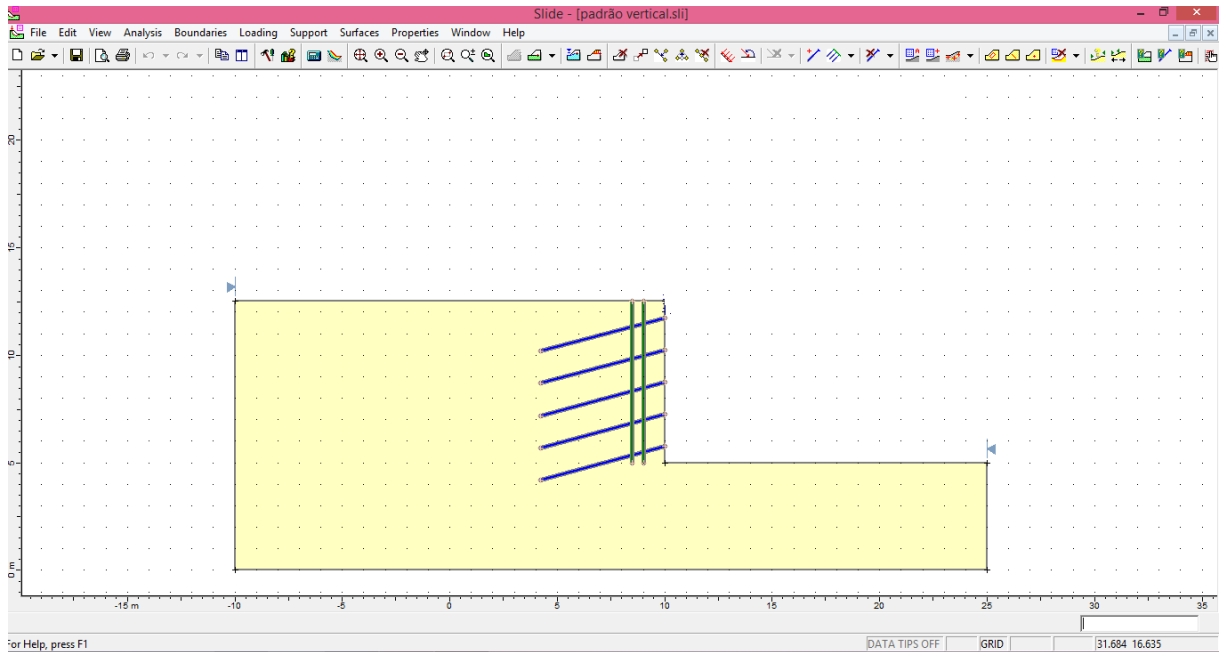


Figura 3.2: Modelagem no *slide* com 2 grampos verticais

A Tabela 3.4 apresenta um resumo das análises efetuadas utilizando-se o método do equilíbrio limite.

Tabela 3.4: Análises efetuadas pelo método do equilíbrio limite no plaxis 2D (“plate”)

Número	Análise	Altura (m)	Inclinação dos grampos horizontais (°)	Grampo Vertical	Quantidade de Grampos verticais	Espaçamento horizontal grampo horizontal (m)	Espaçamento horizontal do grampo vertical (m)	Rigidez Relativa (Si)
1	7,5_N0_S'H2	7,5	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
2	7,5_S2_S'H2_S'V2 *	7,5	15,0	SIM	2	2	2	3,978
3	7,5_S3_S'H2_S'V2	7,5	15,0	SIM	3	2	2	3,978
4	7,5_S4_S'H2_S'V2	7,5	15,0	SIM	4	2	2	3,978
5	7,5_S2_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	2	2	0,5	3,978
6	7,5_S3_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	3	2	0,5	3,978
7	7,5_S4_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978
8	6_N0_S'H2	6,0	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
9	6_S4_S'H2_S'V0,5	6,0	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978
10	9_N0_S'H2	9,0	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
11	9_S4_S'H2_S'V0,5	9,0	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978

* 7,5 de altura de escavação; S de sim para grampos verticais; 2 para quantidade de grampos verticais; S' de espaçamento horizontal: S'H é espaçamento horizontal do grampo horizontal e S'V é espaçamento horizontal do grampo vertical. Os valores seguidos a esses símbolos são os valores adotados para os espaçamentos.

3.1.3. Geração dos pontos de análise e cálculo

Determinadas a geometria do problema e as propriedades dos materiais, parte-se então para a região onde se encontrarão os centros dos círculos das superfícies de ruptura. Para isso, foi definida uma região com espaçamento de 40 intervalos na direção x e 40 intervalos na região y, como mostra a Figura 3.3.

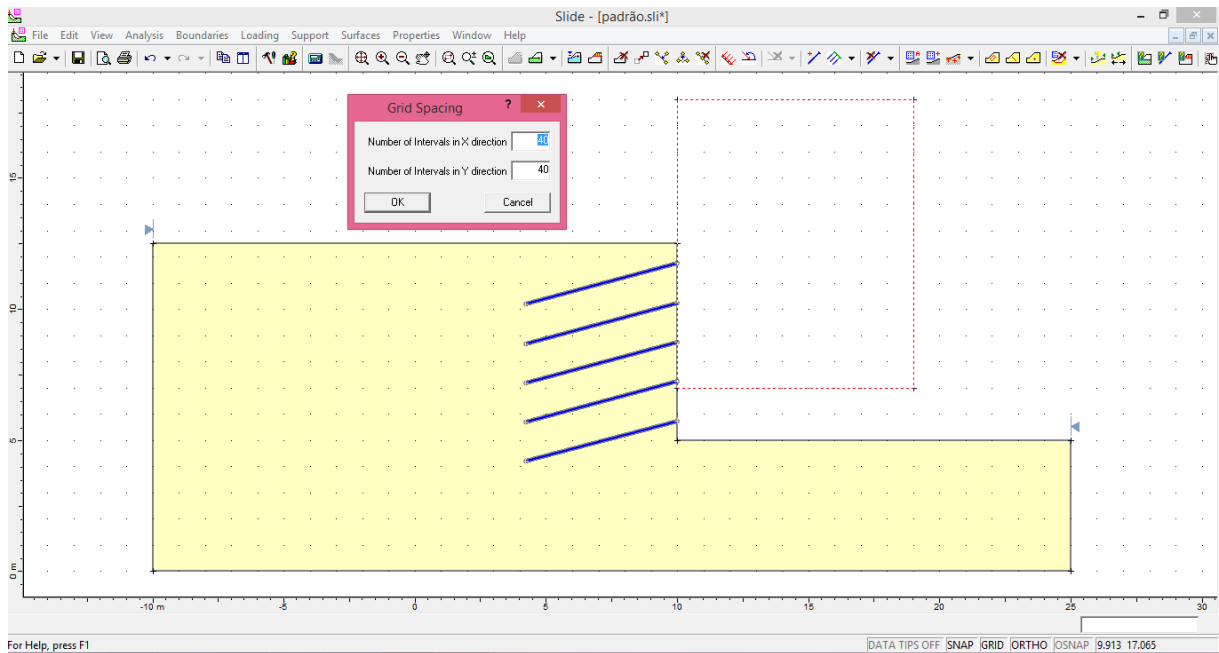


Figura 3.3: região dos centros das possíveis superfícies de ruptura.

Definida essa região, o próximo passo é calcular. Para isso utiliza-se o comando *compute*. O programa então analisa as possíveis superfícies de ruptura. Feito os cálculos, através do comando *interpreté* aberta a janela dos resultados. Nesta janela é possível ver a superfície com menor fator de segurança encontrado para cada método de análise, sendo eles: *Bishop* simplificado; *jambu* simplificado, *Spencer*; e *morgenstern-price*. Para a análise do modelo padrão foi utilizado o método *Bishop* simplificado.

3.2. Modelagem numérica no software Plaxis 2D com elemento “geogrid”.

A Tabela 3.5 apresenta um resumo das análises efetuadas utilizando-se o método dos elementos finitos (*Plaxis2D*).

Tabela 3.5: Análises efetuadas pelo método dos elementos finitos plaxis 2D (“geogrid”).

Número	Análise	Altura (m)	Inclinação dos grampos horizontais (°)	Grampo Vertical	Quantidade de Grampos verticais	Espaçamento horizontal grampo horizontal (m)	Espaçamento horizontal do grampo vertical (m)	Rigidez Relativa (Si)
1	7,5_NO_S'H2	7,5	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
2	7,5_S2_S'H2_S'V2 *	7,5	15,0	SIM	2	2	2	3,978
3	7,5_S3_S'H2_S'V2	7,5	15,0	SIM	3	2	2	3,978
4	7,5_S4_S'H2_S'V2	7,5	15,0	SIM	4	2	2	3,978
5	7,5_S2_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	2	2	0,5	3,978
6	7,5_S3_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	3	2	0,5	3,978
7	7,5_S4_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978
8	6_NO_S'H2	6,0	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
9	6_S4_S'H2_S'V0,5	6,0	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978
10	9_NO_S'H2	9,0	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
11	9_S4_S'H2_S'V0,5	9,0	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978

* 7,5 de altura de escavação; S de sim para grampos verticais; 2 para quantidade de grampos verticais; S' de espaçamento horizontal: S'H é espaçamento horizontal do grampo sub-horizontal e S'V é espaçamento horizontal do grampo vertical. Os valores seguidos a esses símbolos são os valores adotados para os espaçamentos.

Para a realização das análises numéricas utilizou-se o software *PLAXIS 2D v.8.2*. O software *Plaxis* constitui-se de quatro subprogramas, aqui denominados plataformas. Essas plataformas são: *Input*, *Calculation*, *Output* e *Curves*. Neste item será mostrada a criação do modelo padrão nessas plataformas.

3.2.1. Plataforma *input*

3.2.1.1. Configurações gerais

Para iniciar o modelo numérico na plataforma *input*, o programa pede que sejam definidos alguns dados gerais a respeito dos modelos de cálculo, unidades e dimensões na interface de trabalho do programa. A Figura 3.4 mostra os dados inseridos para o modelo padrão deste trabalho.

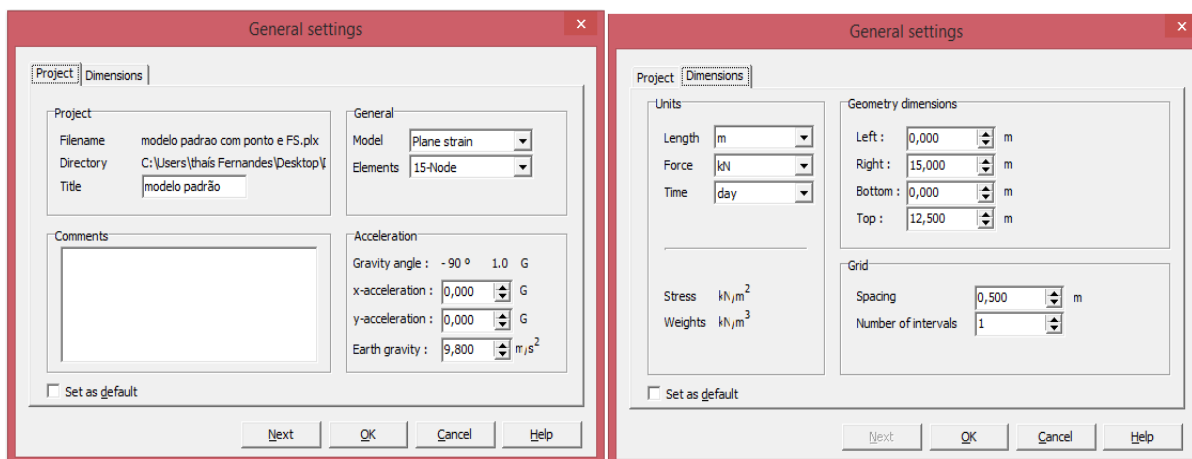


Figura 3.4: Configurações gerais do modelo padrão.

O modelo de análise utilizado foi o de deformação plana. Este caso foi utilizado para geometrias que apresentam seção transversal em que as deformações na direção *z* (direção perpendicular ao plano do “papel”) são nulas. A Figura 3.5 mostra esta consideração, onde também se observa a malha de elementos finitos que, gerada pelo software, forma triângulos que definem os nós dos elementos finitos. Já na opção número de elementos, escolhe-se o número correspondente a quantidade de nós que irão compor a malha de elementos finitos para cada triângulo. Para os modelos apresentados neste trabalho, foram escolhidos 15 nós (Figura 3.6). Isso quer dizer que, para cada triângulo da malha, 15 nós terão os deslocamentos

calculados e 12 pontos em seu interior terão o cálculo de tensões e deformações. Essa é a opção de maior precisão oferecida pelo programa, indicada, portanto, para cálculos mais criteriosos.

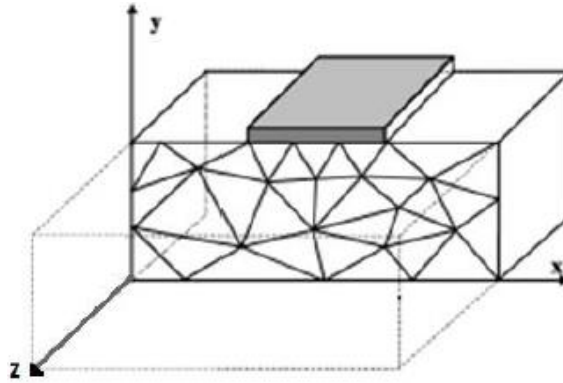


Figura 3.5: Deformação Plana (BRINKGREVE *et al.*, 2002)

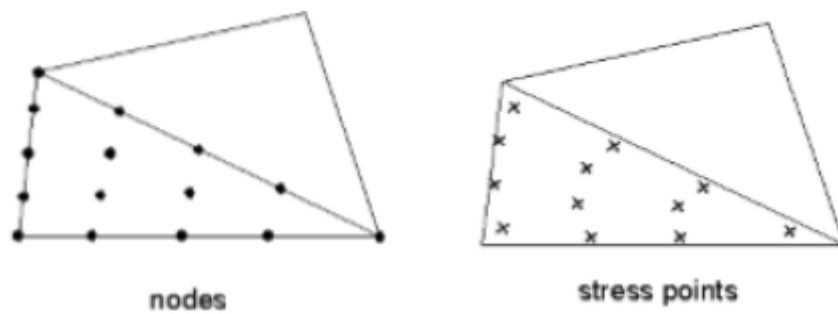


Figura 3.6: 15 nós (BRINKGREVE *et al.*, 2002)

3.2.1.2. Geometria

Para criar o modelo padrão foi desenhado uma geometria 2D para representar o maciço com 15 metros de comprimento e 12,5 metros de profundidade. A escavação possui 5 metros de comprimento e 7,5 metros de profundidade, sendo que as etapas de escavação são representadas por linhas na geometria que foram feitas a cada 1,5 metros (as etapas de escavação são definidas na plataforma *calculation*). Observa-se que, como no caso do método de equilíbrio limite, o modelo padrão servirá de base para comparações com outros modelos, através de parametrização. Não foi considerado nível d'água nas análises numéricas 2D.

Foram utilizados 5 grampos com inclinação de 15° e comprimento de 6 metros, como mostra a Figura 3.7. Os grampos foram inseridos à meia altura de cada etapa de escavação (0,75 m), sendo que o espaçamento vertical entre eles foi de 1,5 metros. Para que o espaçamento horizontal fosse definido, utilizou-se um pequeno trecho de 50 cm utilizando-se o elemento barra, e no trecho restante utilizou-se o elemento geogrid. Definiu-se o espaçamento horizontal de 2 metros. Este procedimento foi necessário, pois o elemento geogrid não permite a escolha do espaçamento horizontal. Já o elemento barra não permite que haja atrito entre solo e a barra (ou seja, este elemento aplicado ao caso de uma cortina atirantada corresponde ao trecho livre). Dessa forma ao se proceder aos cálculos a estrutura colapsava, o que não se verificou na análise de equilíbrio limite nas mesmas condições.

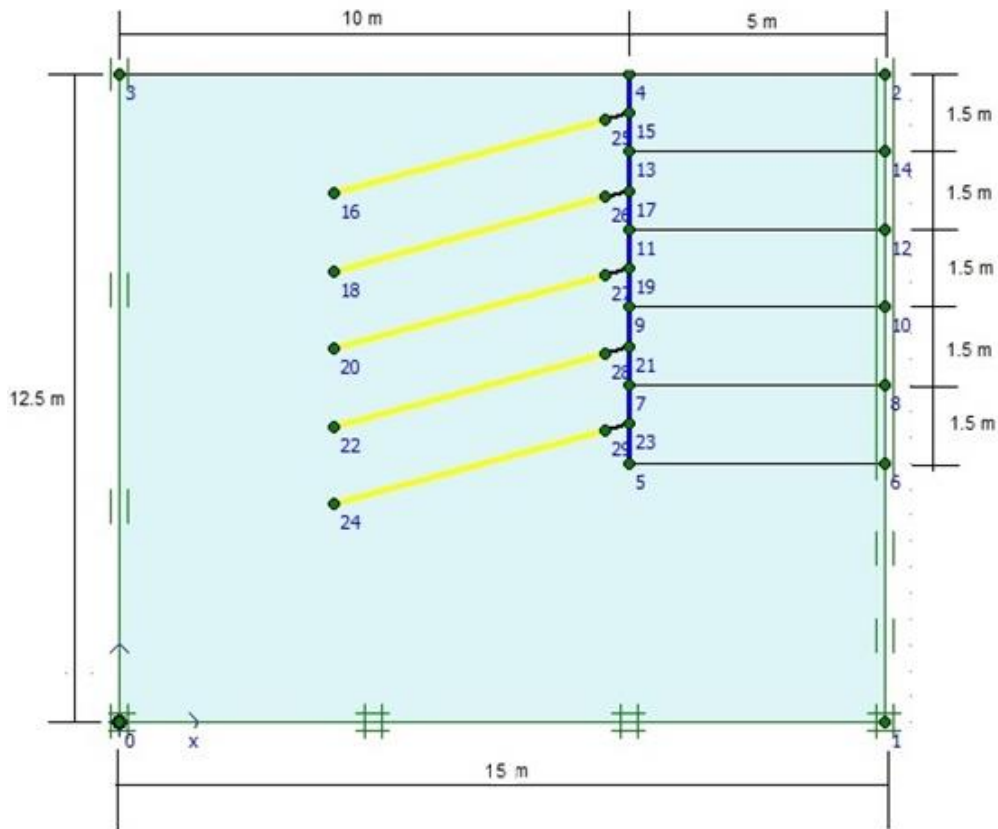


Figura 3.7: Geometria do modelo padrão.

A Figura 3.8 apresenta a análise número 2, com 2 grampos verticais.

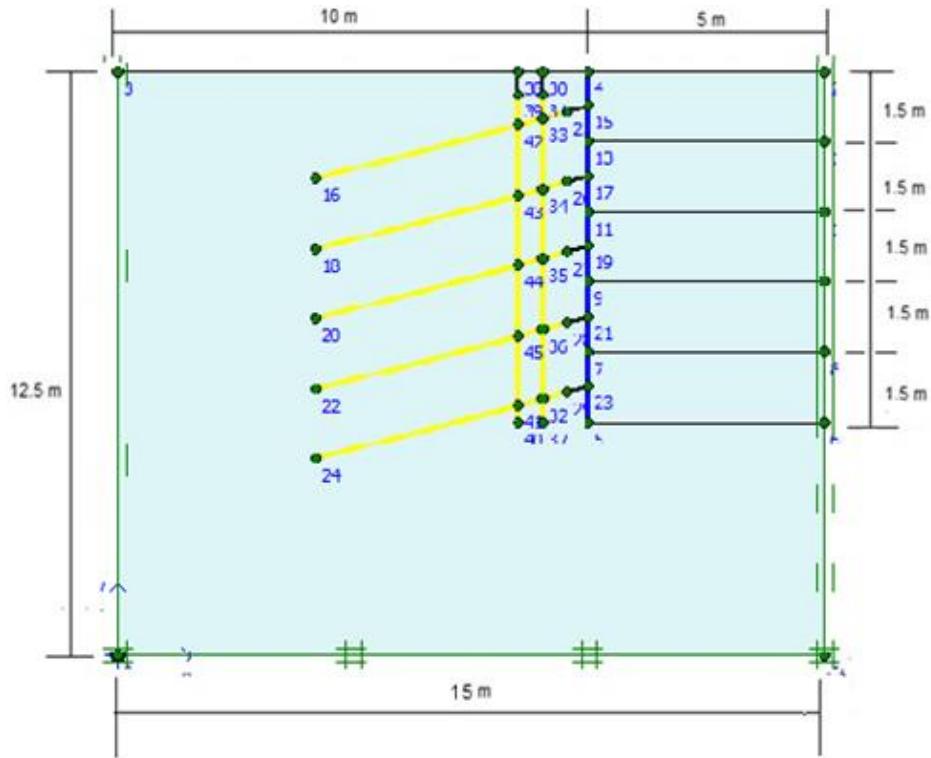


Figura 3.8: Análise com 2 grampos verticais modelada com elemento “geogrid”.

Para as condições de bordo do maciço, foi adotada a opção *standard fixities*. Esta é uma opção padrão do programa e aplicada para muitos estudos geotécnicos. Assim, os deslocamentos horizontais nas bordas laterais foram fixados iguais à zero, assim como os deslocamentos verticais e horizontais no bordo inferior.

Outro detalhe a ser observado na Figura 3.7 é a ausência do elemento interface que representaria a interação entre o solo e a estrutura. Neste trabalho, não foi considerado o deslizamento relativo na interface solo-parede e nem solo-grampo, pois foi verificado que o uso do elemento interface não altera significativamente o resultado, como podemos ver na comparação entre os fatores de segurança encontrados para a modelagem com interface e a modelagem sem interface (Tabela 3.6).

Tabela 3.6: Fator de segurança encontrados para modelagem com e sem o elemento interface.

Etapa da escavação	Fator de segurança	
	Sem interface	Com interface
1	3,83	3,81
2	3,25	3,17

3	2,81	2,72
4	2,41	2,41
5	2,09	2,10

3.2.1.3. Propriedades dos materiais

Após definir a geometria do modelo padrão, foram definidas as propriedades dos materiais presentes no modelo (solo, grampos e parede de concreto projetado). O modelo constitutivo escolhido para o solo, foi o de Mohr-Coulomb, que, de acordo com Brinkgreve *et al.* (2002), é geralmente usado como uma primeira aproximação do comportamento do solo. Os cálculos poderiam ser refinados utilizando o modelo constitutivo “Hardening soil Model” de forma a considerar a variação do módulo elástico do solo com a tensão de confinamento. Para a análise, é necessário que se conheça o tipo de comportamento, o peso específico saturado (γ_{sat}) e não saturado (γ_{unsat}), a permeabilidade horizontal (k_x) e vertical (k_y), o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν), a coesão efetiva (c'), o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e o ângulo de dilatância (Ψ). Apesar de não haver nível d'água foi escolhido um valor típico de permeabilidade apenas para que o programa pudesse fazer os cálculos. A Tabela 3.7 mostra todos os parâmetros utilizados para o solo do modelo padrão.

Tabela 3.7: Propriedades e parâmetros do solo

Propriedades	
Modelo	Mohr-Coulomb
Tipo de comportamento	Drenado
γ_{unsat} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20
Kx e Ky (m/dia)	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Parâmetros	
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^4$
ν	0,30
c' (kN/m ²)	10
ϕ' (°)	35
Ψ (°)	2

Na janela interfaces, é necessário escolher o valor que representa a interação solo-grampo que simula a resistência ao arrancamento dos grampos. Neste trabalho não foi utilizado a interface solo-grampo nem solo-parede.

A tensão cisalhante em solos é dada pela equação (3.2).

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}\phi \quad (3.2)$$

Dividindo a equação acima pela área de contato, tem-se a equação (3.3).

$$F = N \cdot \text{tg}\phi; \quad (3.3)$$

Sendo $R_{\text{inter}} \cdot \text{tg}\phi = \mu$, a (3.3) pode ser escrita como:

$$F = N \cdot \mu.$$

Para o caso da superfície de contato solo-solo, $R_{\text{inter}}=1$. No caso da superfície de contato solo-pasta de cimento, R_{inter} é um valor entre 0,7 e 0,8 (BRINKGREVE *et al.*, 2002). Neste trabalho foi utilizado o valor de $R_{\text{inter}}=0,75$. Este foi o valor utilizado para se comparar o comportamento com e sem interface. Em verdade este valor não provocou diferença nas análises, pois, como comentado anteriormente, não se utilizou a interface solo-grampo nem solo-parede.

Adotado o tipo de comportamento da parede como elástico-linear, suas propriedades de entrada exigidas pelo programa são: rigidez axial (EA_{parede}) dado em força por unidade de distância na direção fora do plano (kN/m); rigidez de flexão (EI_{parede}) dado em força-distância ao quadrado por unidade de distância na direção fora do plano (kNm²/m); peso (w) dado em força por unidade de área (kN/m²) e coeficiente de Poisson (ν), conforme apresenta a Tabela 3.8.

De acordo com Brinkgreve *et al.* (2002), a espessura equivalente (d) é calculada pelo programa automaticamente a partir dos valores de rigidezes adotados, como mostra a equação (3.4).

$$d = \sqrt{12 \times \frac{EI}{EA}} \quad (3.4)$$

O momento de inércia (I_{parede}) foi calculado conforme a equação (3.5) para uma espessura $h_{\text{parede}} = 0,05$ m e faixa de comprimento $b = 1$ m, conforme Figura 3.9. Portanto, I_{parede} vale $1,04 \times 10^{-5}$ m⁴/m.

$$I_{\text{parede}} = \frac{bxh^3}{12} \quad (3.5)$$



Figura 3.9: Esquema da parede de concreto projetado em um comprimento de 1 m e altura de 3 m.

Adotando-se módulo de elasticidade do concreto $E_{\text{concreto}}=21 \times 10^6$ kN/m², peso específico do concreto projetado $\gamma_{\text{parede}}=25$ kN/m³ e $d_{\text{parede}} = 0,05$ m, os cálculos para encontrar os valores das rigidezes (EA_{parede} e EI_{parede}) e do peso (w) foram desenvolvidos conforme as equações (3.6), (3.7) e (3.8). Os valores encontrados são apresentados na Tabela 3.8.

$$EA_{\text{parede}}=E_{\text{concreto}} \times d_{\text{parede}} \quad (3.6)$$

$$EI_{\text{parede}} = E_{\text{concreto}} \times I_{\text{parede}} \quad (3.7)$$

$$W = \gamma_{\text{parede}} \times d_{\text{parede}} \quad (3.8)$$

Tabela 3.8: Propriedades da parede de concreto projetado

Propriedades Gerais	
Modelo	Elástico-linear
EA (kN/m)	$1,05 \cdot 10^6$
EI (kNm ² /m)	218,4
d (m)	$5 \cdot 10^{-2}$
w(kN/m/m)	1,25
v	0,20

Para o grampo (sistema barra-cimento) foi considerada uma barra de aço de 36 mm centrada em um furo de 100 mm de diâmetro (Figura 3.10). O grampo foi modelado como possuindo comportamento elástico-linear, utilizando-se elementos de barra nos 0.50m iniciais e em seguida o elemento geogrid, conforme explicado anteriormente. Posteriormente, os grampos foram modelados utilizando-se o elemento do PLAXIS denominado de “Plate”, como será visto no item 3.3.

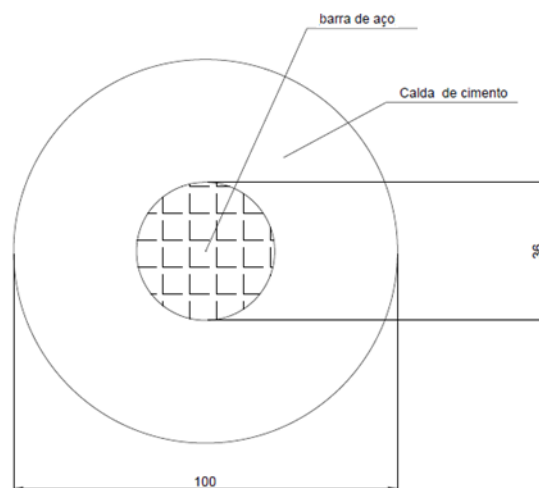


Figura 3.10: Esquema da Seção Transversal do grampo

O módulo de rigidez à tração (EA) do grampo é o módulo de elasticidade do aço multiplicado pela área do aço, somado ao módulo de elasticidade do cimento multiplicada pela área ocupada pela calda de cimento, observando-se que o módulo de elasticidade adotado para a calda de cimento foi o módulo de elasticidade do concreto. A área de aço é 1020 mm² (Ø=36mm) e a área preenchida pela calda de cimento é 6830 mm². Portanto, pela equação (3.9) temos que $E_{eq}A_{grampo}$ vale 357630 kN.

$$E_{eq} \times A_{grampo} = E_{aço} \times A_{aço} + E_{calda} \times A_{calda} \quad (3.9)$$

A parcela da rigidez axial da calda de cimento poderia ser desprezada, pois não há contribuição da calda de cimento ao esforço de tração.

Tabela 3.9: Propriedades dos grampos

Propriedades Gerais	
Modelo	Elástico-linear
EA (kN)	$3,58 \cdot 10^5$
Espaçamento horizontal (m)	2,0

3.2.1.4. Geração da malha de elementos finitos

Definidas a geometria do modelo e as propriedades dos materiais, o próximo passo é a geração da malha de elementos finitos. Há duas formas de refinar a malha no software: refinamento global e refinamento localizado. Neste trabalho, utilizou-se o refinamento global *médium* e também o refinamento da linha (grampos), que faz com que na região próxima aos grampos a malha fique com refinamento mais fino (Figura 3.11).

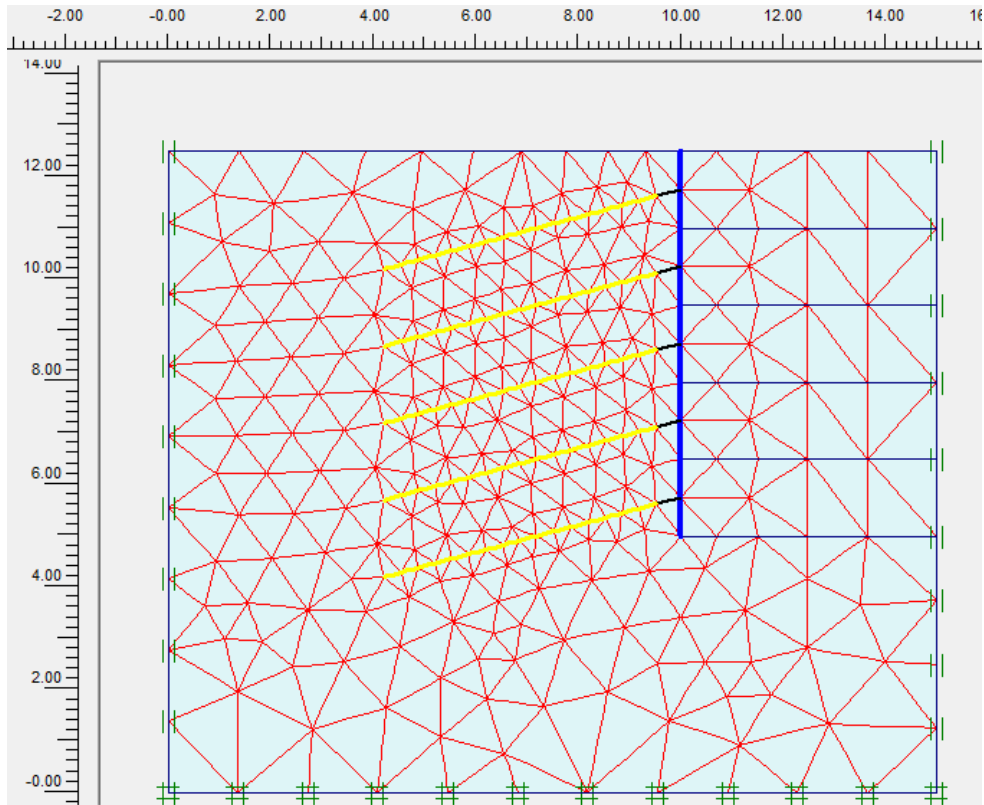


Figura 3.11: Malha de elementos finitos gerada pelo programa.

3.2.1.5. Condições iniciais

É necessário estabelecer as condições iniciais de pressão de água e tensões no maciço para que seja finalizada a modelagem na plataforma *input*. Neste trabalho, a modelagem foi feita considerando ausência de nível d'água, portanto poro-pressões nulas. Neste caso, foi gerado um nível freático na base do modelo, mostrado na Figura 3.12.

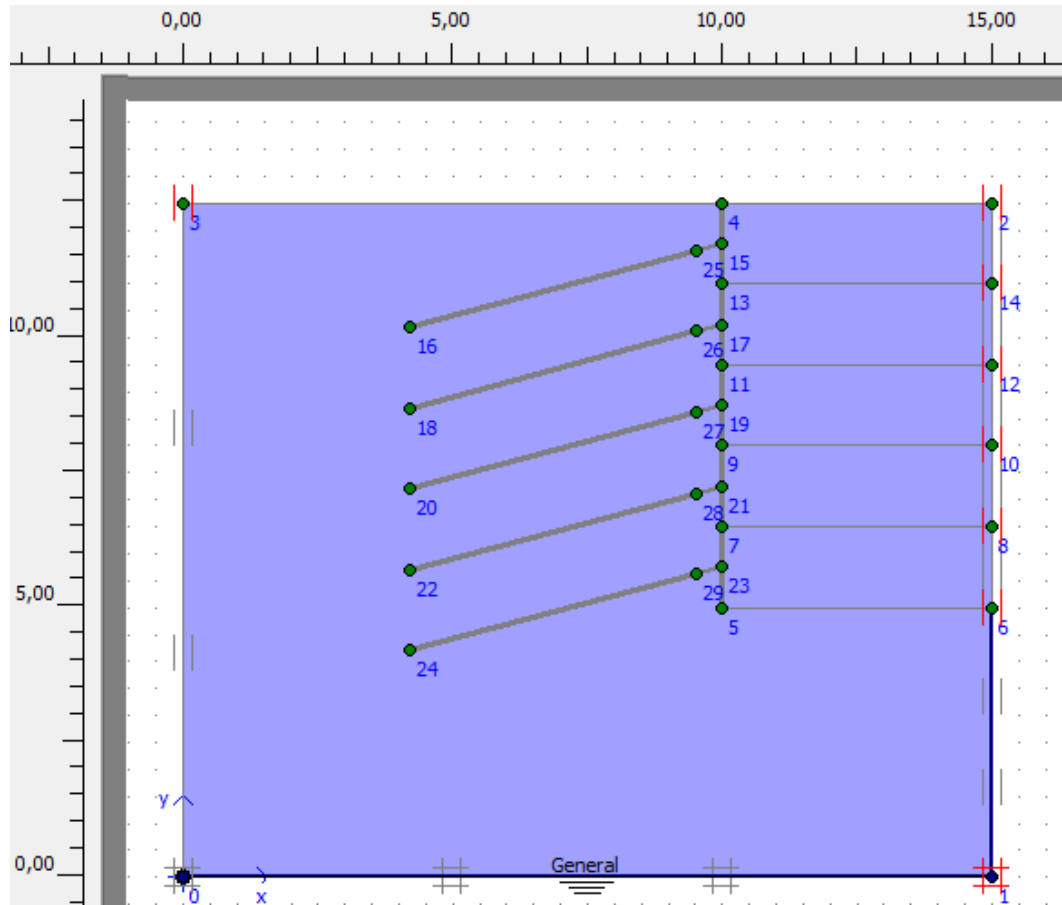


Figura 3.12: poropressões iniciais no modelo.

Após a definição das poropressões iniciais, as tensões efetivas iniciais foram geradas pelo procedimento denominado *K₀ Procedure*. Este procedimento baseia-se no conceito do empuxo que o solo exerce estando em repouso, onde o coeficiente de empuxo no repouso K_0 relaciona a tensão efetiva inicial horizontal ($\sigma'_{h,0}$) com a tensão efetiva inicial vertical ($\sigma'_{v,0}$) pela relação $\sigma'_{h,0} = K_0 \times \sigma'_{v,0}$. Essas tensões iniciais são causadas pela atuação da gravidade na massa de solo que forma o maciço, e representam o estado de equilíbrio no solo não perturbado (Brinkgreve *et al*, 2002).

Para o cálculo das tensões iniciais, o programa utiliza o valor de K_0 e o ΣM_{weight} . O primeiro é calculado automaticamente pela relação $K_0 = 1 - \text{sen}\phi$. Neste caso, o valor de K_0 para o modelo padrão, onde $\phi' = 35^\circ$, foi de $1 - \text{sen}35^\circ = 0,426$. Já o ΣM_{weight} representa a proporção de gravidade que é aplicada, o valor padrão de 1,0 é sugerido pelo programa, que significa que todo o peso do solo foi ativado. Este foi o valor adotado. (Brinkgreve *et al*,

2002). A razão de sobreadensamento considerada foi igual a 1 ($OCR=1$), mais adequado a um solo residual.

Observa-se que, neste caso, como a superfície do maciço é horizontal, foi possível aplicar o *K₀-Procedure*. Caso o maciço não seja horizontal, tensões efetivas iniciais são geradas por outro procedimento que o programa oferece, chamado *Gravity Loading* (Brinkgreve et al., 2002).

3.2.2. Plataforma *Calculation*

Modelada a geometria do problema e geradas as condições iniciais de cálculo, o próximo passo é a modelagem na plataforma calculation. Nesta plataforma definem-se os tipos de cálculo, as etapas de construção e os pontos na malha de elementos finitos, onde serão determinados os deslocamentos horizontais e verticais na plataforma curves.

Em cada fase deve ser escolhido o tipo de cálculo. Nas fases de construção, foram escolhidas a opção *plastic calculation*, para que fosse executada a análise de deformação elasto-plástica do modelo. De acordo com Brinkgreve *et al.* (2002), este tipo de cálculo deve ser utilizado quando o excesso de poropressões não varia com o tempo e é adequado para a aplicação geotécnica deste estudo. Portanto, esta opção de cálculo não considera os efeitos causados pelo tempo, exceto para os casos de solos moles, onde há excesso de poropressões.

Para que fosse possível alterar a geometria do problema em cada etapa de construção, a opção *staged construction* foi selecionada no campo *loading input*. Assim, definiram-se 15 fases de construção, onde estão as cinco (5) etapas construtivas da obra, visto que, três (3) fases de construção compõe cada etapa construtiva, a saber: escavação do solo em 1,5 metros de profundidade, colocação dos grampos (abertura do furo, preenchimento do furo com calda de cimento e colocação da barra de aço) e revestimento de concreto projetado (parede). A Figura 3.13 mostra a representação da primeira etapa construtiva (fases de escavação 1, grampo 1 e parede 1).

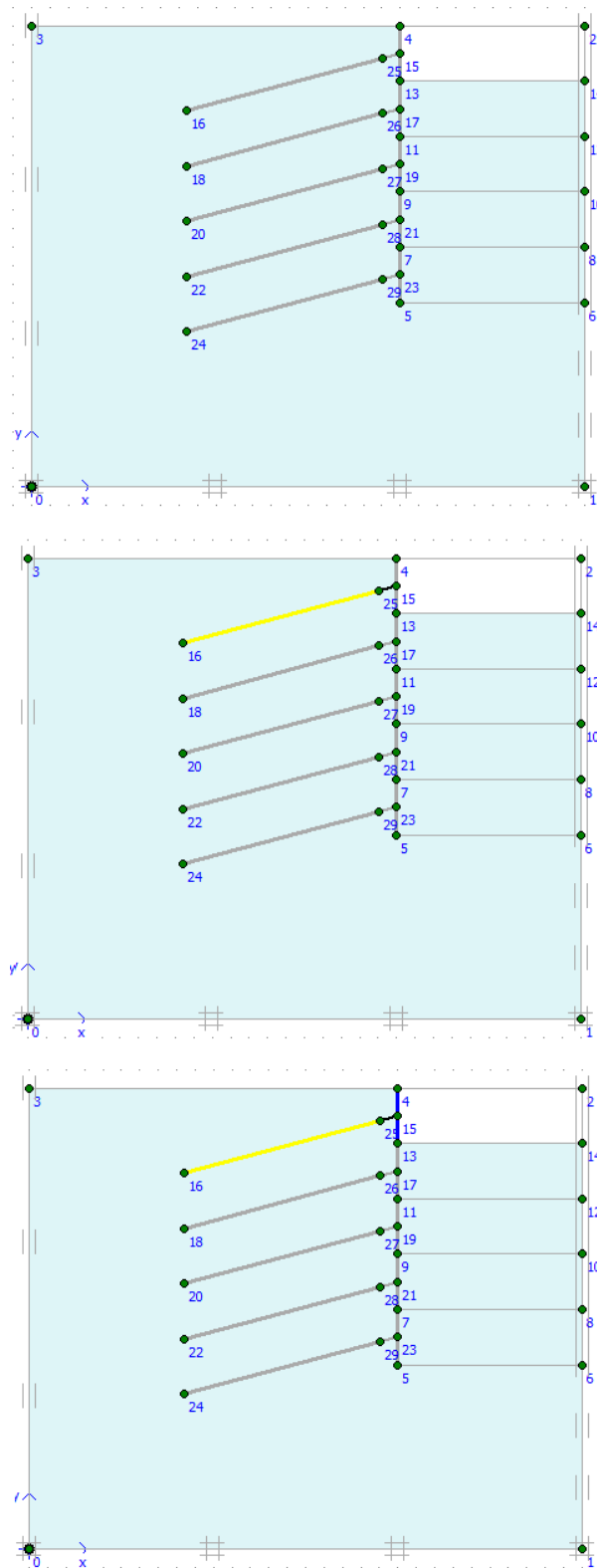


Figura 3.13: Fase 1: Escavação, instalação do grampo e revestimento com concreto projetado

Para que haja o cálculo do fator de segurança, é necessário criar uma fase de cálculo onde o tipo de cálculo é a opção Phi/c reduction. De acordo com Brinkgreve et al. (2002), nesta opção o programa diminui gradativamente os valores do intercepto coesivo (c) e do ângulo de atrito (ϕ) até que haja a ruptura do maciço. No momento desta falha o fator de segurança global será determinado e é dado pela equação (3.10).

$$FS = \frac{c}{c_{ruptura}} = \frac{tg \phi}{tg \phi_{ruptura}} \quad (3.10)$$

A Figura 3.14 apresenta as fases de cálculo criadas para o modelo padrão na plataforma *Calculation*.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 day	0	0	0
✓ escavação 1	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 day	1	1	2
✓ grampo 1	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 day	2	3	4
✓ parede 1	3	2	Plastic	Staged construction	0,00 day	3	5	6
✓ escavação 2	4	3	Plastic	Staged construction	0,00 day	4	7	12
✓ grampo 2	5	4	Plastic	Staged construction	0,00 day	5	13	17
✓ parede 2	6	5	Plastic	Staged construction	0,00 day	6	18	19
✓ escavação 3	7	6	Plastic	Staged construction	0,00 day	7	20	30
✓ grampo 3	8	7	Plastic	Staged construction	0,00 day	8	31	37
✓ parede 3	9	8	Plastic	Staged construction	0,00 day	9	38	39
✓ escavação 4	10	9	Plastic	Staged construction	0,00 day	10	40	64
✓ grampo 4	11	10	Plastic	Staged construction	0,00 day	11	65	72
✓ parede 4	12	11	Plastic	Staged construction	0,00 day	12	73	74
✓ escavação 5	13	12	Plastic	Staged construction	0,00 day	13	75	131
✓ grampo 5	14	13	Plastic	Staged construction	0,00 day	14	132	140
✓ parede 5	15	14	Plastic	Staged construction	0,00 day	15	141	142
✓ FS etapa 1	16	3	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 day	3	143	542
✓ FS etapa 2	17	6	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 day	6	543	942
✓ FS etapa 3	18	9	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 day	9	943	1342
✓ FS etapa 4	19	12	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 day	12	1343	1742
✓ FS etapa 5	20	15	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 day	15	1743	2142

Figura 3.14: Configurações de cálculo na plataforma *calculation*.

3.2.2.1. Plataforma *output* e *curves*

Na plataforma *output* são apresentadas as deformações e as tensões sofridas pelo modelo de acordo com as etapas de cálculo. Já na plataforma *curves*, são geradas as curvas com os resultados para cada ponto escolhido na malha de elementos finitos, em cada etapa de

cálculo. Nestes pontos, identificam-se os resultados e são colocados em planilhas do Excel, para que possam ser apresentados. A Figura 3.15 mostra os deslocamentos horizontais no modelo apresentado na plataforma *output*.

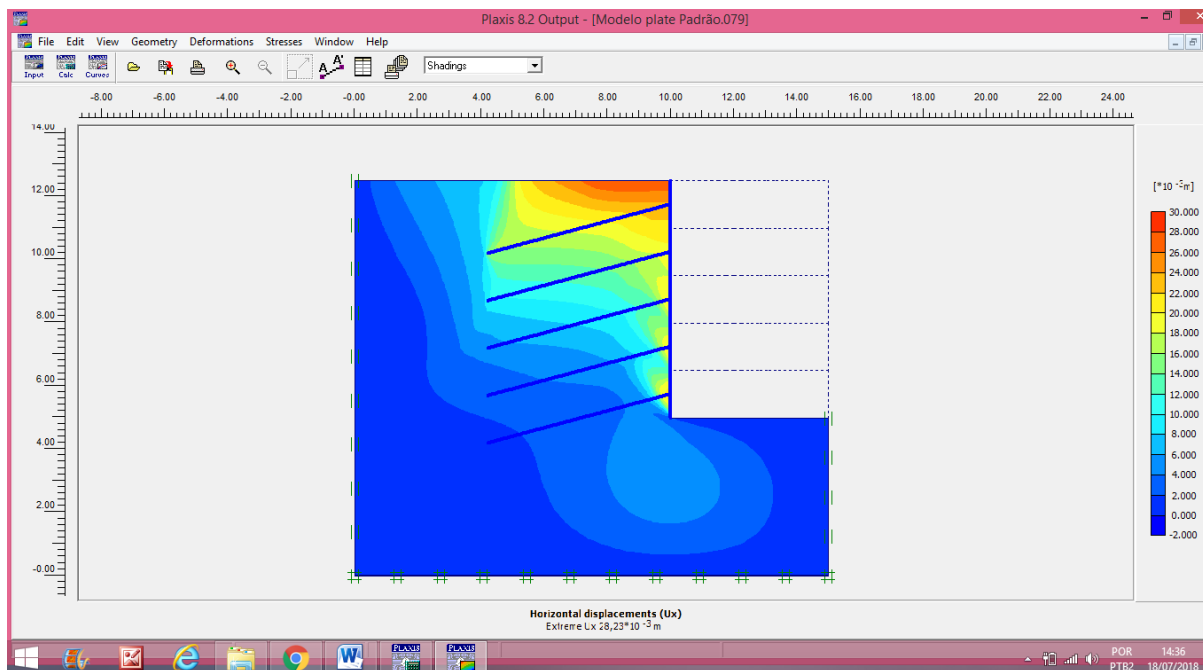


Figura 3.15:deslocamentos horizontais apresentados na plataforma output.

3.3. Modelagem numérica no software Plaxis 2D com elemento “plate”.

Como dito anteriormente, primeiramente os grampos foram modelados como elementos tipo “Geogrid” com rigidez equivalente axial ($E_{eq}A$). Porém, este modelo não considera a rigidez a flexão (EI) dos grampos, que poderia ser solicitada pelos esforços nos grampos verticais. Para que esta rigidez fosse considerada, os grampos foram modelados como placas (*plates*) no *plaxis* 2D com rigidez equivalente. Ressalta-se que todas as etapas de configurações iniciais, geometria, propriedades do solo e do concreto projetado, geração das malhas de elementos finitos, condições iniciais, e cálculo permaneceram inalteradas. A alteração se deu somente na parte onde foi modelado o grampo. A Figura 3.16 apresenta a estrutura padrão com o elemento “plate”, e a Figura 3.17 apresenta a análise número 2 com o elemento “plate”, conforme Tabela 3.5.

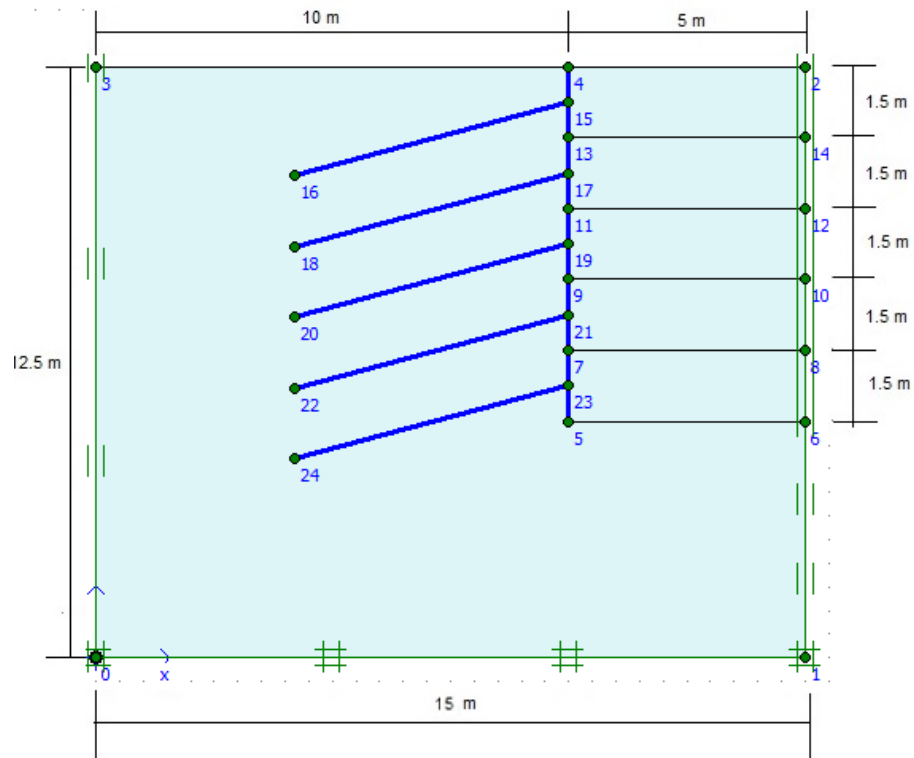


Figura 3.16: Estrutura padrão modelada com o elemento “plate”.

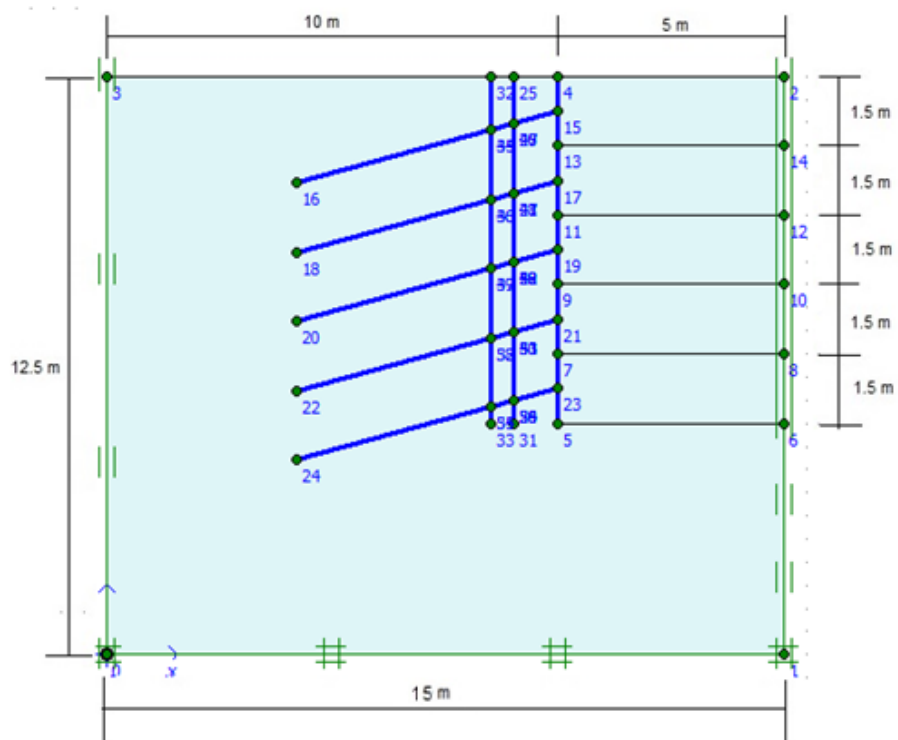


Figura 3.17: Análise com 2 grampos verticais modelada com elemento “plate”.

Rawat e Gupta (2016) analisaram uma estrutura de solo grampeado modelando os grampos como placas. Para que o modelo seja mais representativo, o módulo de elasticidade do grampo (E_{eq}) foi calculado como no item 3.2.1.3. Sendo a área do grampo igual a $7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, o E_{eq} é encontrado através da equação (3.11) e vale $4,56 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$.

$$E_{eq} = \frac{E_{eq} \times A_{grampo}}{A_{grampo}} \quad (3.11)$$

Segundo Rawat e Gupta (2016), a rigidez axial equivalente pode ser calculada seguindo a equação (3.12) e a rigidez a flexão equivalente é dada pela equação (3.13).

$$EA_{eq} = \frac{E_{eq} \pi d^2}{S_h \cdot 4} \quad (3.12)$$

$$EI_{eq} = \frac{E_{eq} \pi d^4}{S_h \cdot 64} \quad (3.13)$$

Onde: d é o diâmetro do grampo (sistema barra-cimento);

E_{eq} é o módulo de elasticidade do grampo; e

S_h é o espaçamento horizontal.

O diâmetro da placa equivalente ao grampo é calculado conforme equação (3.4). Para o modelo padrão, o espaçamento horizontal é de 2 m, o diâmetro do grampo é de 100 mm e o módulo de elasticidade do grampo (E_{eq}) é $4,56 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$. Substituindo-os nas equações (3.12) e (3.13) têm-se os resultados mostrados na Tabela 3.10, juntamente com os demais parâmetros adotados.

Tabela 3.10: Propriedades dos grampos modelados como plate e com espaçamento horizontal igual a 2 m.

Grampos	
Propriedades Gerais	
Modelo	Elástico-linear
EA (kN/m)	$1,79 \cdot 10^5$
EI (kNm ² /m)	111,9
d (m)	0,087
w(kN/m/m)	2,17
v	0,35

Como visto na Tabela 3.5, algumas análises foram feitas utilizando o espaçamento horizontal do grampo vertical de 0,5m. Para esses casos, os valores de EA e EI são mostrados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Propriedades dos grampos modelados como plate e com espaçamento horizontal igual a 0,5 m.

Grampos	
Propriedades Gerais	
Tipo de comportamento	Elástico
EA (kN/m)	$7,15 \cdot 10^5$
EI (kNm ² /m)	447,04
d (m)	0,087
w(kN/m/m)	2,17
v	0,350

3.4. Modelagem numérica no software Plaxis 3D

As análises numéricas feitas no software plaxis 3D v.2017 são apresentadas na Tabela 3.12. O software 3D possui as plataformas *input* e *output*. A plataforma *calculation* está dentro da plataforma *input* e a plataforma *curves* está dentro da plataforma *output*. Ao iniciar a plataforma *input*, e começar um novo projeto, será aberta a janela de propriedades do projeto, onde são definidos o nome do projeto, e as características do modelo. Nesta janela define-se o tamanho do bloco de solo em 3D, colocando as coordenadas máximas e mínimas nos eixos x e y (Figura 3.18). Para este trabalho foi definido x e y mínimo em 0, x máximo em 15 e y máximo em 8.

Tabela 3.12: Análises efetuadas pelo método dos elementos finitos plaxis 3D.

Número	Análise	Altura (m)	Inclinação dos grampos horizontais (°)	Grampo Vertical	Quantidade de Grampos verticais	Espaçamento horizontal grampo horizontal (m)	Espaçamento horizontal do grampo vertical (m)	Rigidez Relativa (Si)
1	7,5_NO_S'H2	7,5	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
2	7,5_S2_S'H2_S'V2 *	7,5	15,0	SIM	2	2	2	3,978
3	7,5_S3_S'H2_S'V2	7,5	15,0	SIM	3	2	2	3,978
4	7,5_S4_S'H2_S'V2	7,5	15,0	SIM	4	2	2	3,978
5	7,5_S2_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	2	2	0,5	3,978
6	7,5_S3_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	3	2	0,5	3,978
7	7,5_S4_S'H2_S'V0,5	7,5	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978
8	6_NO_S'H2	6,0	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
9	6_S4_S'H2_S'V0,5	6,0	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978
10	9_NO_S'H2	9,0	15,0	NÃO	0	2	-	3,978
11	9_S4_S'H2_S'V0,5	9,0	15,0	SIM	4	2	0,5	3,978

* 7,5 de altura de escavação; S de sim para grampos verticais; 2 para quantidade de grampos verticais; S' de espaçamento horizontal: S'H é espaçamento horizontal do grampo sub-horizontal e S'V é espaçamento horizontal do grampo vertical. Os valores seguidos a esses símbolos são os valores adotados para os espaçamentos

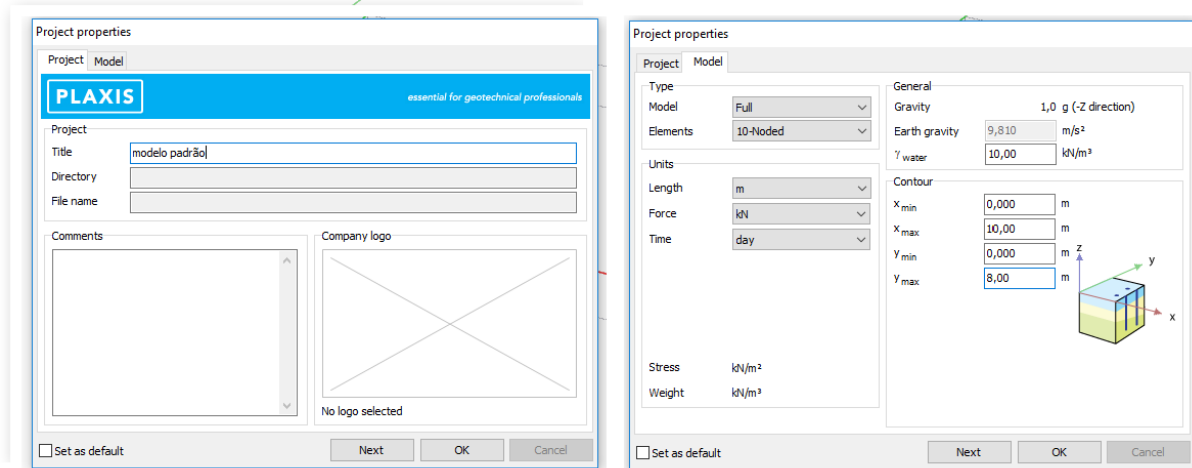


Figura 3.18: Janela propriedades do projeto.

Após a definição das propriedades, na aba solo, cria-se um furo (*borehole*), onde são definidas divisões no solo e é definida a posição do nível d'água. A Figura 3.19 apresenta a janela onde o furo é criado. Neste trabalho, foram definidas divisões a cada 1,5 m e o nível d'água definido na posição 12,5 m. Portanto o solo fica na condição seca (*dry*).

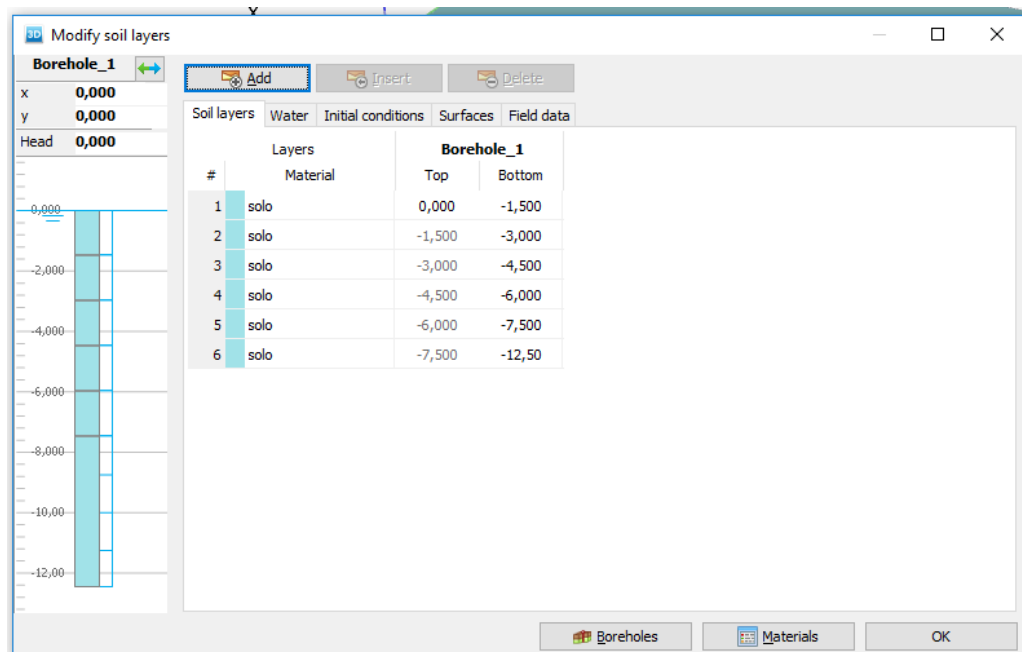


Figura 3.19: janela onde é criado o furo e definidas as divisões e a posição do NA.

A seguir, definem-se os solos que serão considerados em cada uma destas divisões. No caso deste trabalho, foi utilizado um único tipo de solo, cujas propriedades são as mesmas

utilizadas no ambiente 2D, apresentadas na Tabela 3.7. Dessa forma utilizou-se apenas um furo (*borehole*), sendo que perfis mais complexos podem ser simulados com vários furos, sendo cada um furo um resultado de sondagem SPT, num caso real, por exemplo. A Figura 3.20 apresenta a janela onde são definidas as propriedades dos solos.

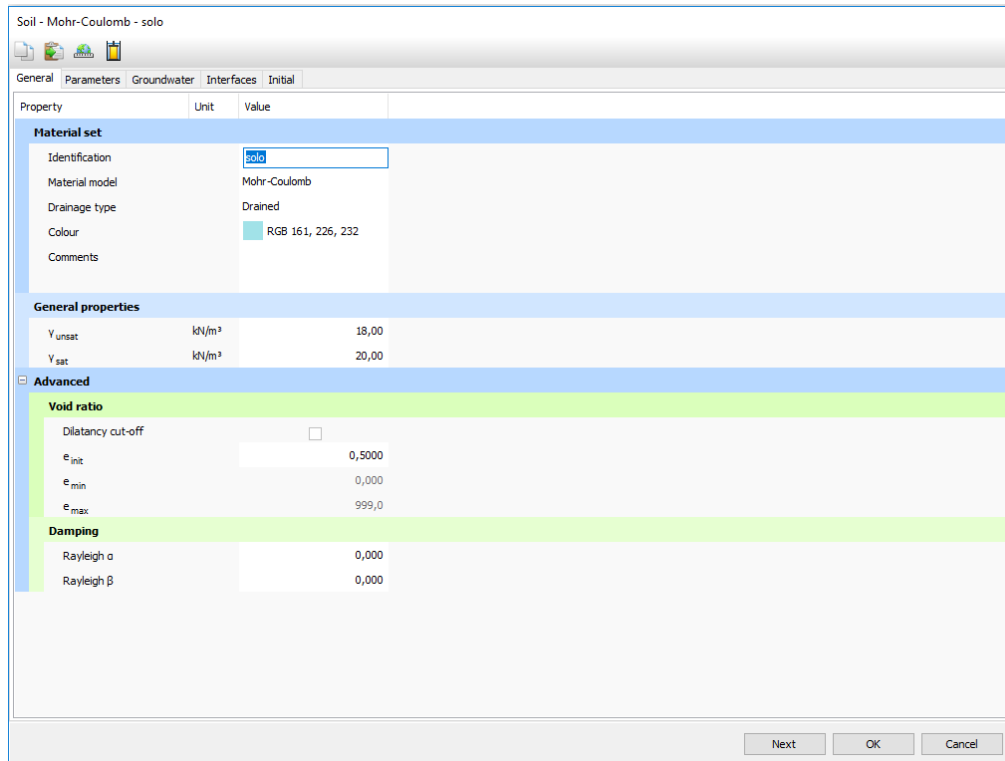


Figura 3.20: Janela onde são definidas as propriedades dos solos.

Ainda na aba solo, são definidos os materiais. Neste trabalho, foram definidas as propriedades para a parede (concreto projetado), e para os grampos, que no ambiente 3D é o elemento “embedded beams.” Para a parede as propriedades são as mesmas descritas na Tabela 3.8. A Figura 3.21 apresenta a janela onde as propriedades da parede são colocadas no Plaxis 3D.

Plate - concreto projetado

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		concreto projetado
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 255
Material type		Elastic
Properties		
d	m	0,05000
γ	kN/m ³	25,00
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
E_1	kN/m ²	21,00E6
E_2	kN/m ²	21,00E6
ν_{12}		0,2000
G_{12}	kN/m ²	8,750E6
G_{13}	kN/m ²	8,750E6
G_{23}	kN/m ²	8,750E6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		<input type="checkbox"/>

OK Cancel

Figura 3.21: Janela onde são inseridas as propriedades da parede de concreto projetado.

Para os grampos, as propriedades descritas são apresentadas na Figura 3.22. O valor adotado para $T_{skin,max}$ é o valor da força de arrancamento descrita no item 3.1.2, tanto no topo do grampo quanto no fim. Por simplificação do comportamento real foi definida uma força constante ao longo do grampo.

Embedded beam - grampos

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		grampos
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
Material type		Elastic
Properties		
E	kN/m ²	45,60E6
γ	kN/m ³	25,00
Beam type		Predefined
Predefined beam type		Massive circular beam
Diameter	m	0,1000
A	m ²	7,854E-3
I ₂	m ⁴	4,909E-6
I ₃	m ⁴	4,909E-6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Axial skin resistance		
Axial skin resistance		Linear
T _{skin, start, max}	kN/m	157,0
T _{skin, end, max}	kN/m	157,0
Base resistance		
F _{max}	kN	500,0

OK Cancel

Figura 3.22: Propriedades definidas para os grampos.

Partindo para a aba estruturas, são colocadas as estruturas utilizadas no modelo. No caso deste trabalho, definiram-se superfícies onde são colocados os revestimentos (plate) e os grampos. Foram utilizados, em cada etapa de escavação, 4 grampos sub-horizontais (Figura 3.23 e Figura 3.24). No caso das análises com grampos verticais, quando utilizados com espaçamento horizontal de 2 metros foram colocados 3 grampos verticais, quando utilizados com espaçamento horizontal de 0,5 metros foram colocados 16 grampos verticais. A parede foi definida como elemento “plate”, no entanto no Plaxis 3D esta poderia também ser inserida como um sólido. Optou-se por utilizar o elemento “plate” de forma a não gerar problemas de malha devido à esbeltez do elemento.

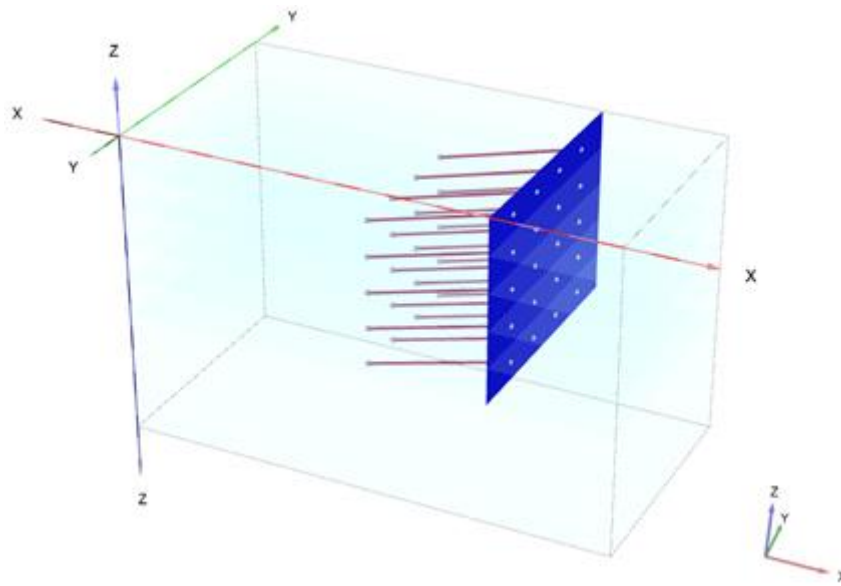


Figura 3.23: Modelo da estrutura padrão, vista em perspectiva, muro com altura igual a 7,5 m, largura igual a 8 m, profundidade igual a 5 m.

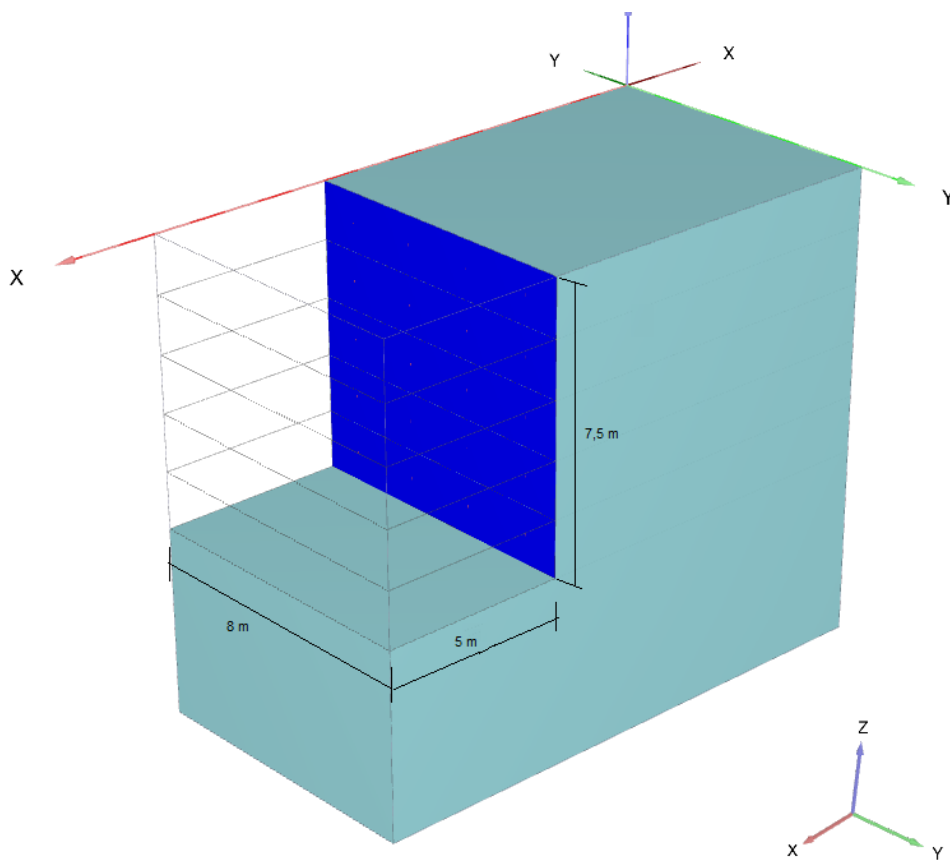


Figura 3.24: Estrutura padrão modelada no Plaxis 3D

A Figura 3.25 apresenta o modelo para a análise com 4 grampos verticais.

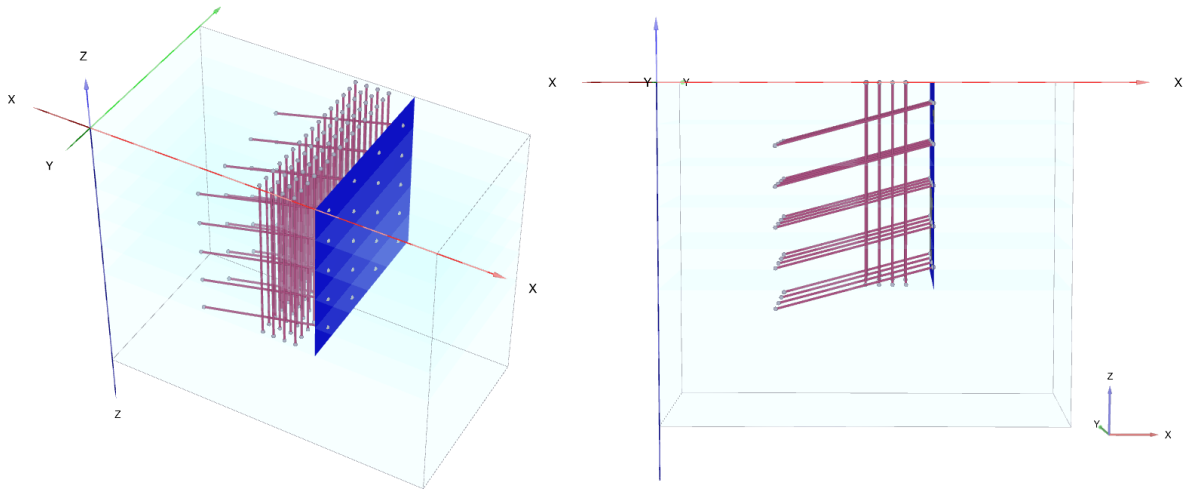


Figura 3.25: Modelo da estrutura com 4 grampos verticais, vista em perspectiva e frontal.

Definidos os elementos estruturais no modelo, gera-se a malha de elementos finitos. Para este trabalho, na modelagem 3D foi escolhido o refinamento muito fino (Figura 3.26). Porém, para as análises 5, 6, 7 e 10, com espaçamento horizontal do grampo vertical igual a 0,5 m o programa não consegue calcular, há uma mensagem de erro, informando que a solução é incorreta, pois há convergência lenta (Figura 3.27) para as malhas muito fina, fina e média. Somente utilizando o refinamento grosso é que o software conseguiu fazer todas as análises e gerar os resultados. Neste caso, foram mantidos todos os parâmetros de controle numéricos, tais como tolerância de erro de 0,01, número máximo de iterações igual a 60, número máximo de etapas igual a 100 e etapas de máxima descarga igual a 5, lembrando que todos esses parâmetros são padrões do programa e o usuário define se usa estes ou muda-os. A visualização da malha é feita na plataforma output e é mostrada na Figura 3.28.

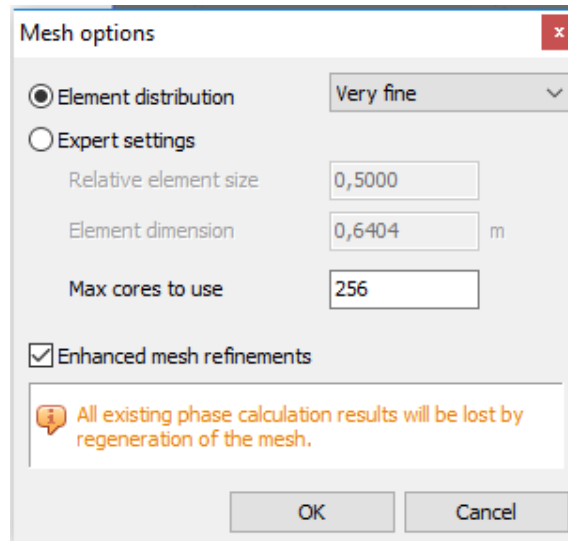


Figura 3.26: Opções de refinamento da malha.

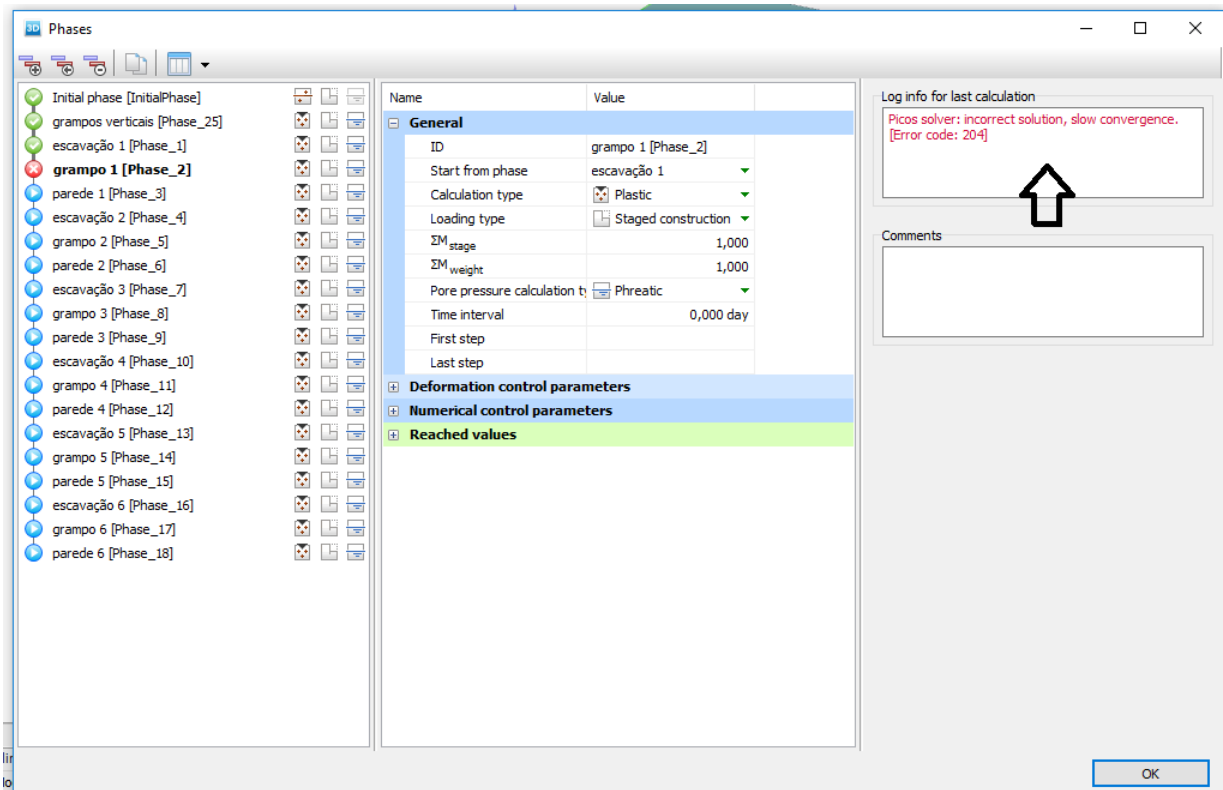


Figura 3.27: Erro encontrado pelo software.

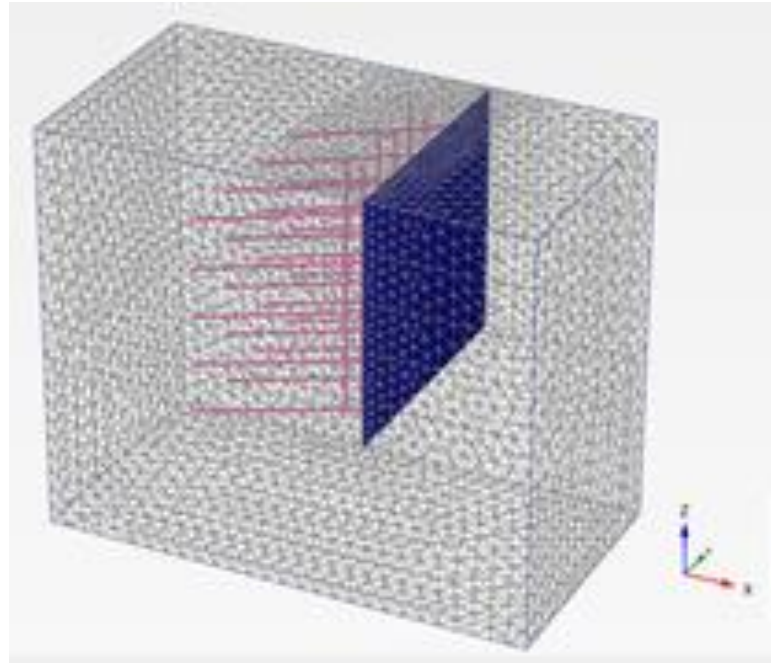


Figura 3.28: visualização da malha (refinamento muito fino)

Na aba de condições de fluxo, são definidas as condições geradas pela posição do nível d'água. Como neste trabalho não há presença do nível d'água, nesta aba nada foi feito. No caso deste trabalho, como não foi considerado o nível de água, não há condições de fluxo para serem avaliadas.

Na aba de estágios de construção, as fases de cálculo são definidas. As fases de cálculo são definidas no plaxis 3D do mesmo modo que no plaxis 2D. As fases de cálculo de fator de segurança também foram definidas do mesmo modo que no plaxis 2D. A Figura 3.29 apresenta a estrutura na ultima fase de cálculo.

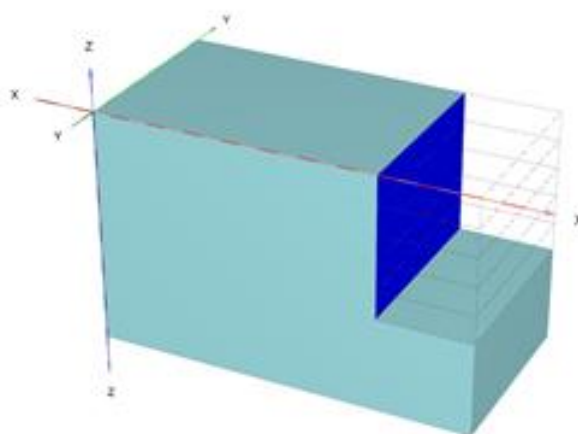


Figura 3.29: Última fase de construção

3.5. Modelagem para análise com parâmetros do solo e rigidez relativa (S_i) reduzidos.

Para que as conclusões e os resultados sejam analisados em estruturas menos rígidas, optou-se por modelar estruturas com rigidez relativa S_i mais baixa. Para isso, alteraram-se os parâmetros do solo, o espaçamento horizontal do grampo sub-horizontal e o diâmetro da barra e do grampo.

O objetivo deste tipo de análise é verificar se um sistema menos rígido sofre alterações significativas com a introdução dos grampos verticais. Um sistema muito rígido pode tornar inócuo o uso dos grampos verticais.

Para isso, além das análises feitas na Tabela 3.5, foram realizadas outras 3 análises apresentadas na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: análises 3D com parâmetros e rigidez reduzidos

Número	Análise	Altura (m)	Inclinação dos grampos horizontais (°)	Grampo Vertical	Quantidade de Grampos verticais	Espaçamento horizontal grampo horizontal (m)	Espaçamento horizontal do grampo vertical (m)	Rigidez Relativa (Si)
12	9_N0_S'H3_BR*	9,0	15,0	NÃO	0	3	-	1,905
13	9_S4_S'H3_S'V2_BR	9,0	15,0	SIM	4	3	2	1,905
14	9_S4_S'H3_S'V0,5_BR	9,0	15,0	SIM	4	3	0,5	1,905

*9 m de altura de escavação; N de não para grampos verticais; 0 para quantidade de grampos verticais; S' de espaçamento horizontal: S'H é espaçamento horizontal do grampo sub-horizontal e S'V é espaçamento horizontal do grampo vertical. Os valores seguidos a esses símbolos são os valores adotados para os espaçamentos. BR é baixa rigidez.

Os parâmetros do solo utilizados para estas análises são apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14: propriedades utilizadas para o solo nas análises com menor rigidez relativa

Propriedades	
Modelo	Mohr-Coulomb
Tipo de comportamento	Drenado
γ_{unsat} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20
Kx e Ky (m/dia)	$1,70 \cdot 10^{-3}$
Parâmetros	
E (kN/m ²)	$12,5 \cdot 10^3$
ν	0,3
c' (kN/m ²)	8,0
ϕ'	30,0
ψ	2,0

Para os grampos, além de variar o espaçamento horizontal dos grampos sub-horizontais, utilizou-se grampos sub-horizontais de 75 mm de diâmetro, com barras de aço de 10 mm de diâmetro e conforme equação (3.9), foi calculado o E_{eq} . As propriedades são apresentadas na Figura 3.30. Para os grampos verticais as propriedades e dimensões foram mantidas como nos modelos com alta rigidez, conforme apresentadas na Figura 3.22.

Embedded beam - grampos sub-horizontais

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		grampos sub-horizontais
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
Material type		Elastic
Properties		
E	kN/m ²	24,30E6
γ	kN/m ³	25,00
Beam type		Predefined
Predefined beam type		Massive circular beam
Diameter	m	0,07500
A	m ²	4,418E-3
I ₂	m ⁴	1,553E-6
I ₃	m ⁴	1,553E-6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Axial skin resistance		
Axial skin resistance		Linear
T _{skin, start, max}	kN/m	157,0
T _{skin, end, max}	kN/m	157,0
Base resistance		
F _{max}	kN	60,00

OK Cancel

Figura 3.30: Propriedades dos grampos sub-horizontais para estrutura de baixa rigidez relativa.

Dessa forma, além de diminuir a rigidez relativa (S_i) também se reduziu a resistência ao cisalhamento do solo.

4. Resultados e discussões

Neste item são apresentados os resultados obtidos nas análises nas condições 2D e 3D. Pela grande quantidade de resultados gerados, optou-se por apresentar neste capítulo somente os resultados para as análises 1 - 7,5_N0_S'H2 (estrutura padrão), 4 - 7,5_S4_S'H2_S'V2 e 7 - 7,5_S4_S'H2_S'V0,5. Os demais resultados são apresentados no apêndice.

O comportamento dos resultados encontrados foi comparado ao comportamento dos resultados em estruturas com baixa rigidez relativa. Assim, verificou-se se os resultados encontrados valem tanto para estruturas que possuem ¹rigidez “normal” quanto para estruturas que possuem baixa rigidez.

4.1. Comparativo de Fator de segurança

A Figura 4.1 apresenta os fatores de segurança encontrados para a estrutura padrão, para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 2 m e para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 0,5 m, modeladas no Slide, no Plaxis 2D com o elemento “Geogrid”, no Plaxis 2D com o elemento “Plate” e no Plaxis 3D. Nota-se que para as modelagens nos programas Slide e Plaxis 2D não houve diferença significativa no fator de segurança entre a estrutura sem grampos verticais (padrão) e as estruturas com 4 grampos verticais. Já no Plaxis 3D houve uma pequena diferença: o fator de segurança aumentou de 2,10 para 2,37 (aproximadamente 13%) comparando a estrutura padrão com a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento de 0,5 m. Já a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento de 2 m não apresentou diferença significativa. Estes dados são apresentados numericamente no item 4.10

¹Rigidez normal diz respeito a valores normalmente utilizados em projetos com o espaçamento vertical e horizontal, diâmetro das barras e diâmetro dos fros bem como valores típicos de E , c' e ϕ' para solos residuais.

Comparando os fatores de segurança utilizando o método do equilíbrio limite (Slide, 2D) com o método dos elementos finitos (Plaxis, 2D e 3D) nota-se que o fator de segurança foi ligeiramente menor. A razão disso pode ser que no método do equilíbrio limite a tração no grampo não depende da deformação imposta pela estrutura.

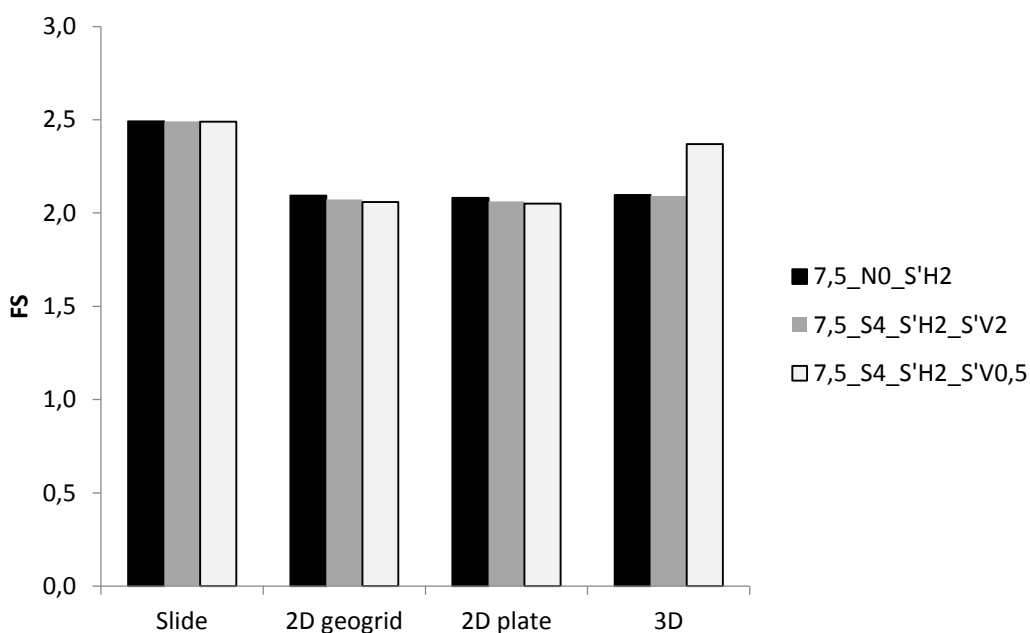


Figura 4.1: Fatores de segurança encontrados em cada software para as análises 7,5_N0_S'H2 (padrão), 7,5_S4_S'H2_S'V2 e 7,5_S4_S'H2_S'V0,5.

4.2. Comparativo do somatório de tração máxima nos grampos sub-horizontais

Na Figura 4.2 nota-se que, comparando a estrutura padrão com as estruturas com 4 grampos verticais, as estruturas com 4 grampos verticais, tanto com espaçamento horizontal do grampo vertical igual a 2 quanto com espaçamento horizontal do grampo vertical igual a 0,5 m, traz uma redução no somatório de trações máximas dos 5 grampos horizontais, exceto para a modelagem 2D utilizando o elemento Geogrid. Esta diferença é de aproximadamente 20% para a modelagem 2D utilizando o elemento plate e para a modelagem 3D.

A Figura 4.2 apresenta o somatório de trações máximas para a estrutura padrão, para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 2 m e para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 0,5 m, modeladas no Plaxis 2D com o elemento Geogrid, no Plaxis 2D com o elemento plate e no Plaxis 3D. Ressalta-se que a barra do grampo é constituída por material do tipo elástico e que a carga de trabalho utilizada na barra do grampo foi a tração máxima, e não a tração de plastificação, que é menor.

No entanto, a partir de certo espaçamento horizontal de grampos verticais como 0,5 m a redução na tração passa a ser muito pouco significativa.

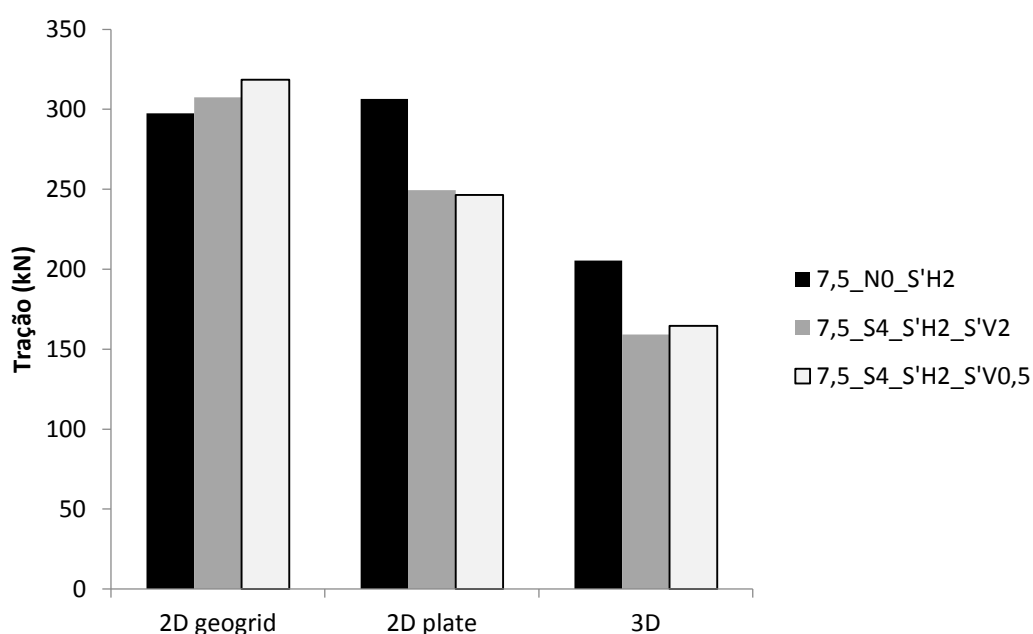


Figura 4.2: Somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais para análises 7,5_N0_S'H2 (padrão), 7,5_S4_S'H2_S'V2 e 7,5_S4_S'H2_S'V0,5.

4.3. Comparativo do deslocamento horizontal (δ_h) final da face

O deslocamento horizontal da face no final da construção para a estrutura padrão é apresentada na Figura 4.3. O deslocamento horizontal da face no final da construção para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 2 m é apresentada na Figura 4.4 e o deslocamento horizontal da face no final da construção para a

estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 0,5 m é apresentada na Figura 4.5. Nota-se que, em todas as análises a modelagem em 3D foi a que obteve menores deformações. Comparando então as análises da estrutura padrão e estrutura com 4 grampos verticais com espaçamento de 0,5 m na modelagem 3D observa-se que, utilizando os grampos verticais, houve uma diminuição de, aproximadamente, 64% do deslocamento no topo da escavação e que, quanto mais próximo da base da escavação menor é essa diferença. Já comparando as análises da estrutura padrão e estrutura com 4 grampos verticais com espaçamento de 2 m na modelagem 3D observa-se que a diminuição foi de 26,5%.

No entanto, em termos de valores absolutos verifica-se Figura 4.3, na Figura 4.4 e na Figura 4.5 (análise 3D) que ao utilizar grampos verticais espaçados horizontalmente de 2m a redução no $\delta_{h_{\text{máx}}}$ é apenas cerca de 4,5 mm e ao utilizar grampos verticais espaçados de 0,5m a redução é de cerca de 10 mm, comparando com as condições sem o uso dos grampos verticais.

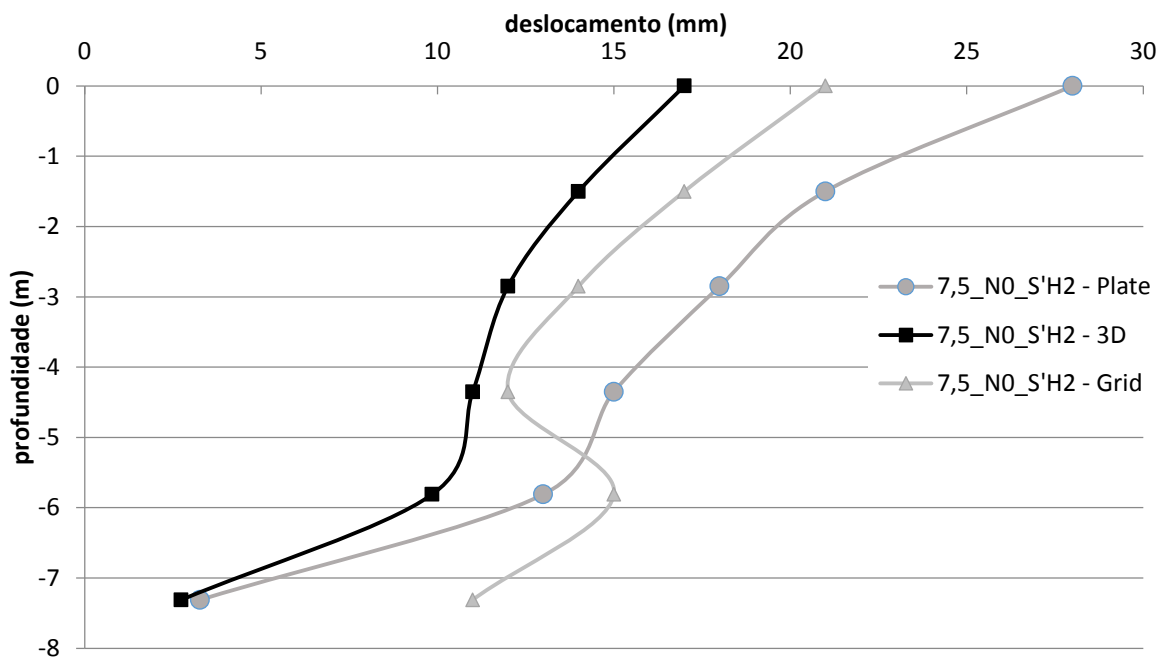


Figura 4.3: Deslocamento horizontal na face para a estrutura padrão - análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.

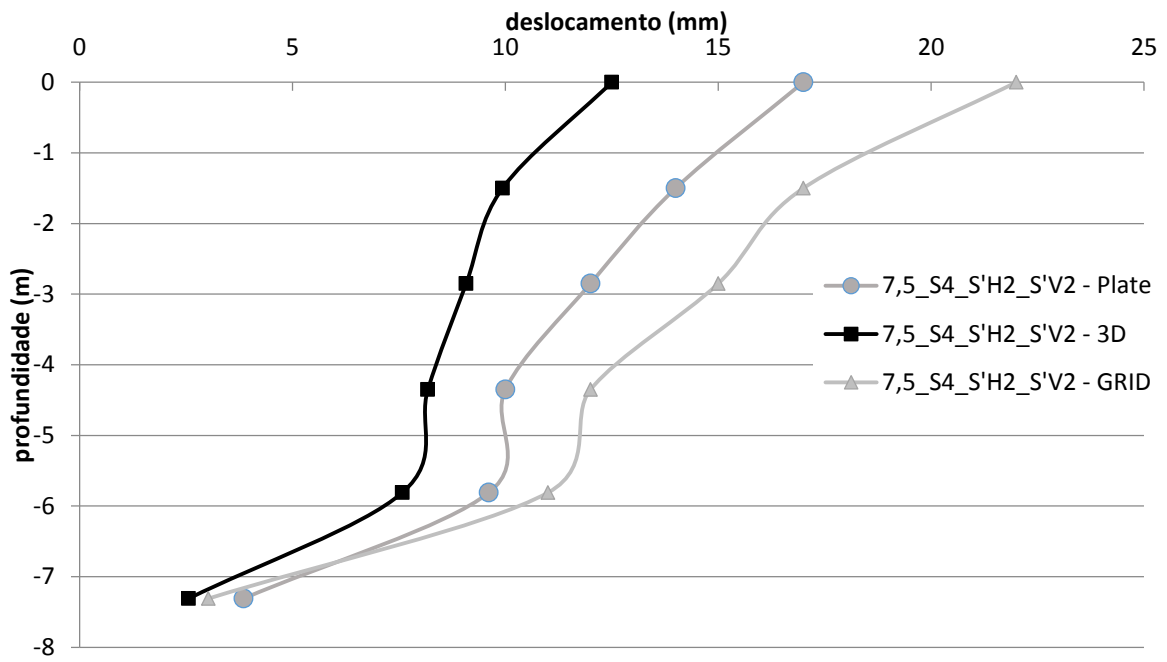


Figura 4.4: Deslocamento horizontal na face para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.

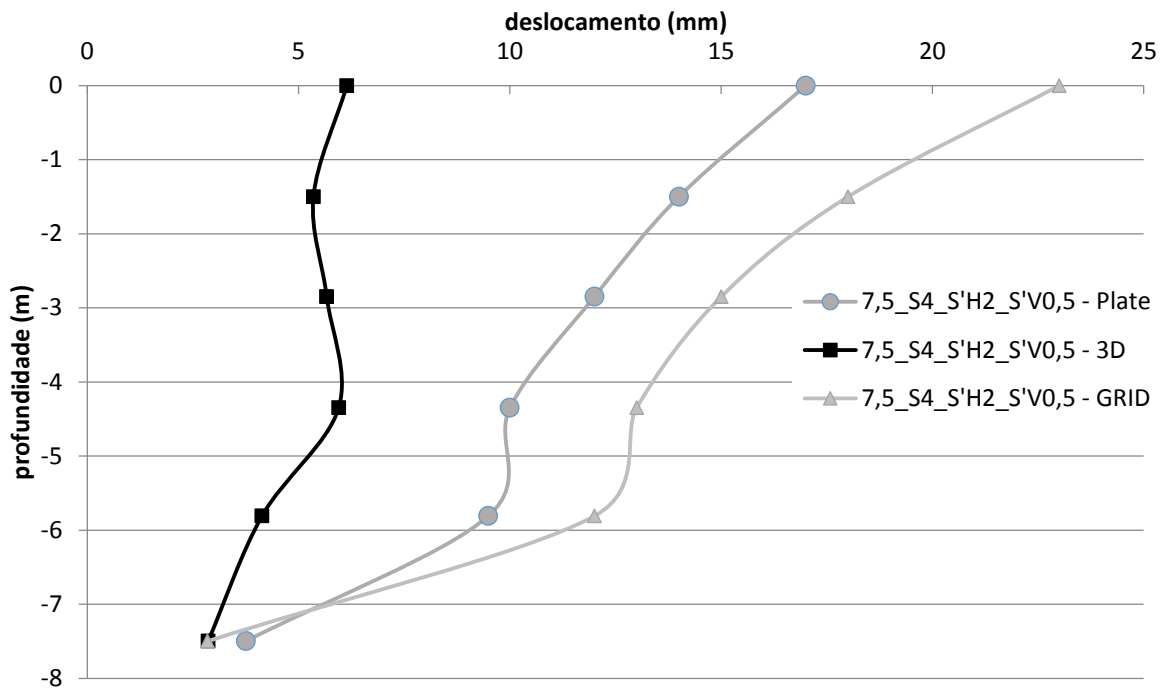


Figura 4.5: Deslocamento horizontal na face para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.

4.4. Comparação da relação entre deslocamento horizontal e vertical no topo

De acordo com Clouterre (1991), os deslocamentos horizontais e verticais na crista do faceamento possuem a mesma ordem de grandeza, sob condição de trabalho e próximo à ruptura. Logo, observa-se na Figura 4.6 que para modelagens diferentes as três análises tiveram um comportamento próximo da condição linear.

Nota-se também que na estrutura em que não foram utilizados os grampos verticais, em todas as modelagens, como os deslocamentos no topo são maiores, a relação fica mais próxima de 1, ou seja, o deslocamento horizontal fica bem próximo do deslocamento vertical. Já quando se utilizam os grampos verticais, os deslocamentos diminuem e esta relação fica mais distante de 1.

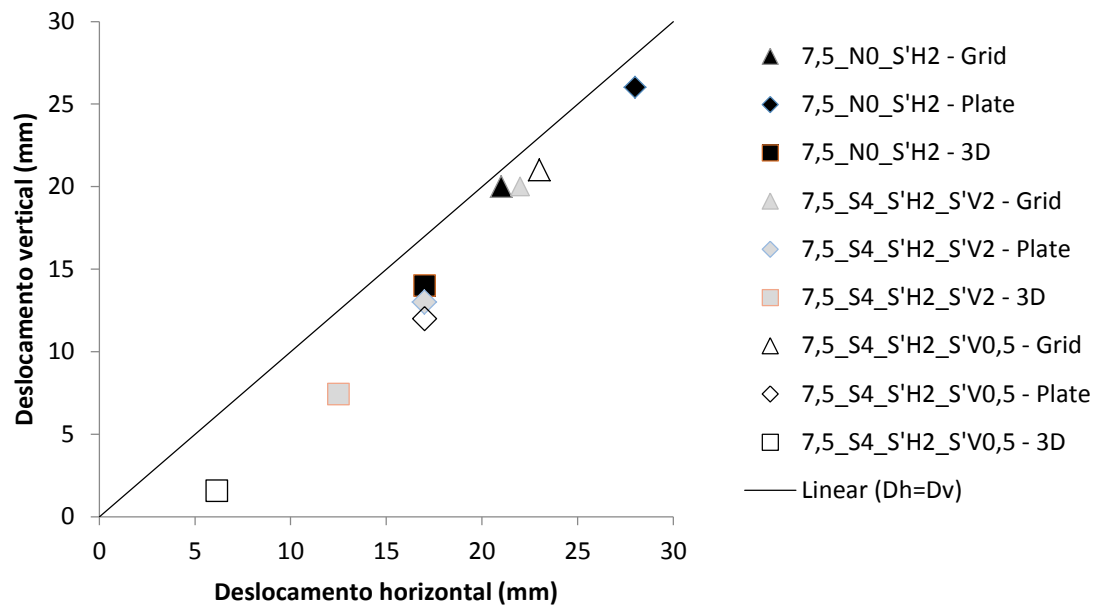


Figura 4.6: Deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical no topo.

4.5. Evolução do deslocamento horizontal da face ao longo da construção

O deslocamento horizontal ao longo da face para cada uma das etapas de escavação é apresentado na Figura 4.7 para a estrutura padrão, na Figura 4.8 para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 2m e na Figura 4.9 para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 0,5m.

Observa-se que para a análise 7,5_N0_S'H2 (estrutura padrão) no início da escavação há um deslocamento negativo na crista do faceamento, que aumenta e se torna positivo conforme avançam as escavações. Na primeira etapa de escavação, ao escavar 1,5 metros há deslocamento no solo até a profundidade de 3 metros. Na segunda etapa, o solo sofre deslocamento até a profundidade de 4,5 metros. Nas terceira e quarta etapas de escavação, ocorre deslocamentos maiores nos pontos anteriores aos pontos de escavação, que voltam a ser menores no ponto seguinte, onde está ocorrendo a escavação. Por fim, na quinta etapa o deslocamento é progressivo, mais alto no topo da face de escavação e diminui até chegar a base da face de escavação.

Nota-se que o mesmo comportamento visto nas terceira e quarta etapas de escavação da estrutura padrão existe também na segunda etapa de escavação para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2. A primeira e ultima etapa possui o mesmo comportamento da estrutura padrão (análise 7,5_N0_S'H2). Já a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 comporta-se igualmente a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2, exceto na última etapa, pois nesta a estrutura tem um deslocamento maior no topo da face de escavação que diminui até aproximadamente 2 m de escavação, volta a aumentar atingindo o deslocamento próximo do deslocamento do topo aos 4 metros de escavação, voltando a diminuir até a base da face de escavação. É interessante observar também que, em todas as análises o deslocamento final (na ultima etapa de escavação) na base da face de escavação é igual ao encontrado na terceira etapa de escavação. Além disso, deslocamentos significativos na face de escavação, só ocorrem a partir da 4ª etapa.

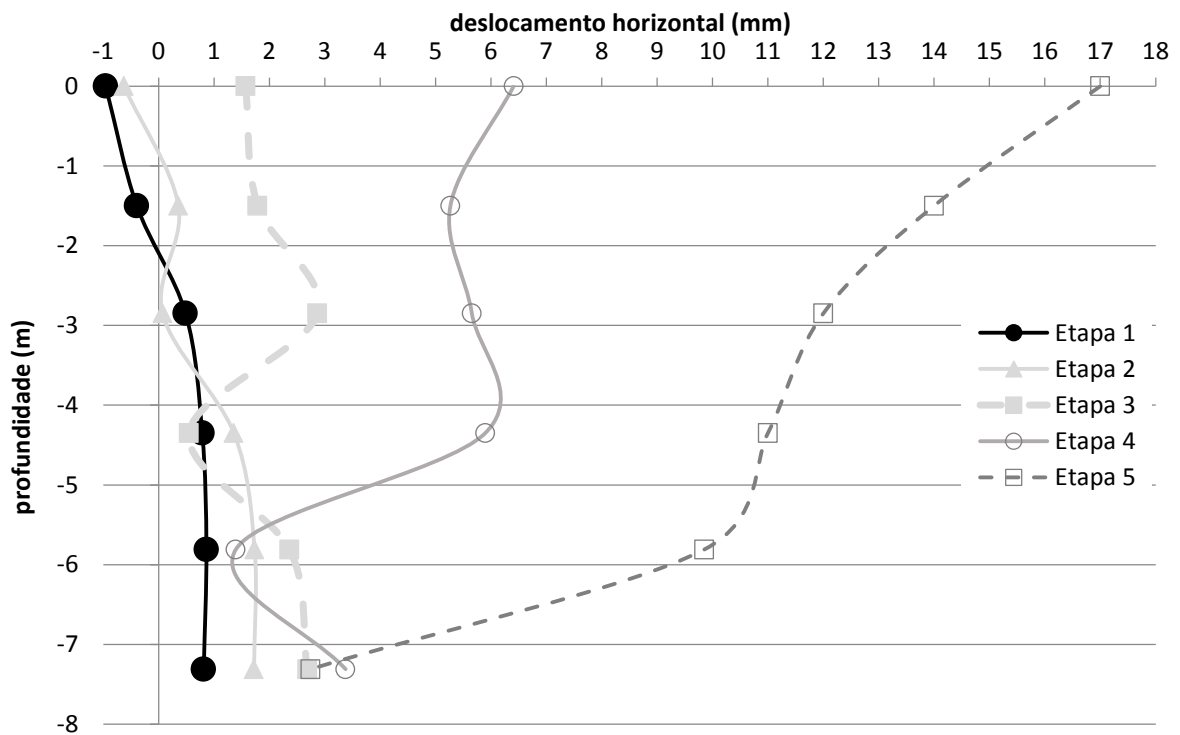


Figura 4.7: Deslocamento horizontal na face para cada etapa de escavação para a análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 3D.

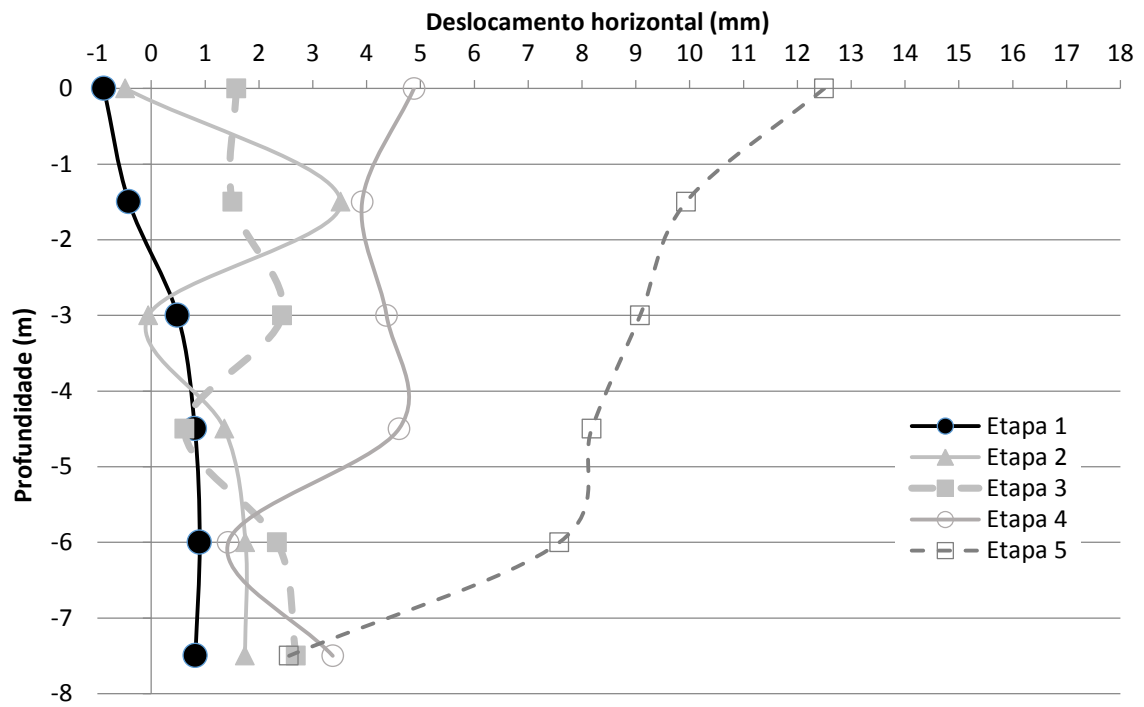


Figura 4.8: Deslocamento horizontal na face para cada etapa de escavação para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 3D.

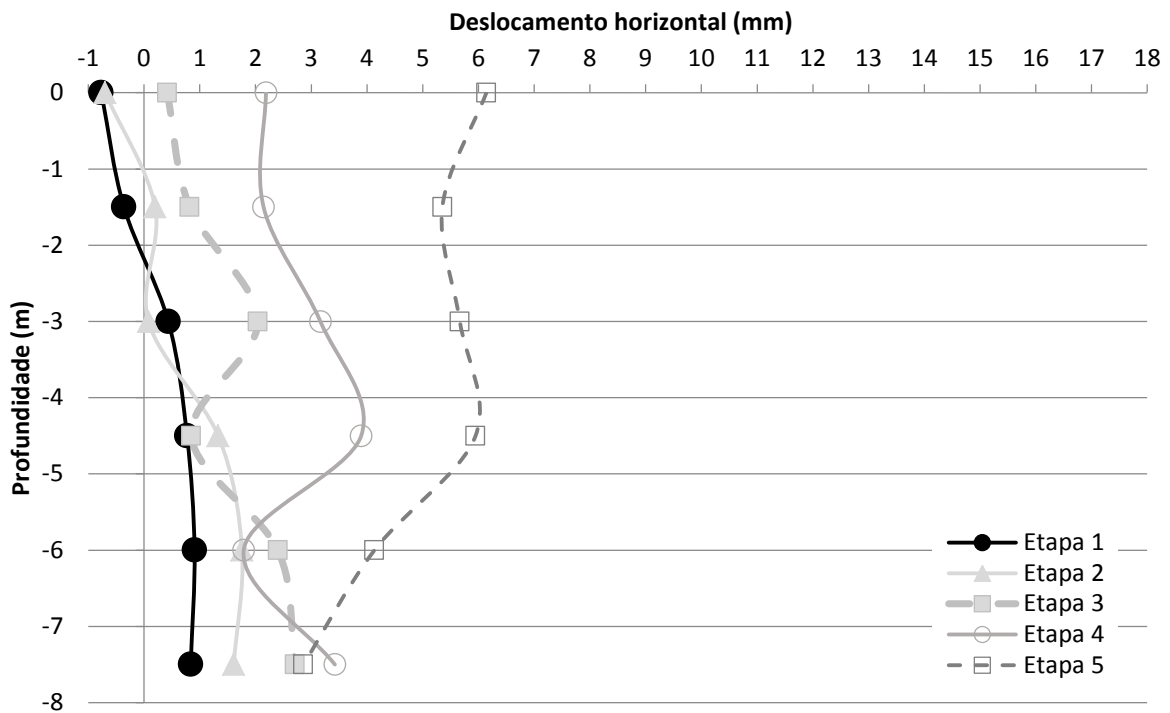


Figura 4.9: Deslocamento horizontal na face para cada etapa de escavação para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 3D.

4.6. Superfície de ruptura

Sabendo que cada grampo sub-horizontal tem um ponto onde ocorre a tração máxima, foram identificados estes pontos e ligados, formando assim uma possível superfície de ruptura. A Figura 4.10 apresenta a possível superfície de ruptura para a estrutura padrão, sem grampos verticais. Já a Figura 4.11 apresenta a possível superfície de ruptura para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 2 m e a Figura 4.12 apresenta a possível superfície de ruptura para a estrutura com 4 grampos verticais e espaçamento horizontal do grampo vertical de 0,5 m. As estruturas analisadas são as que possuem altura de 7,5m e espaçamento entre grampos verticais de 2 m.

Observa-se que no caso da análise com 4 grampos verticais e espaçamento de 2 m o grampo vertical causa uma curvatura na superfície de ruptura, colocando a tração máxima no primeiro grampo sub-horizontal mais próxima da face. Já no caso em que são utilizados

grampos verticais espaçados de 0,5 m a superfície potencial de ruptura é vertical na parte superior da escavação.

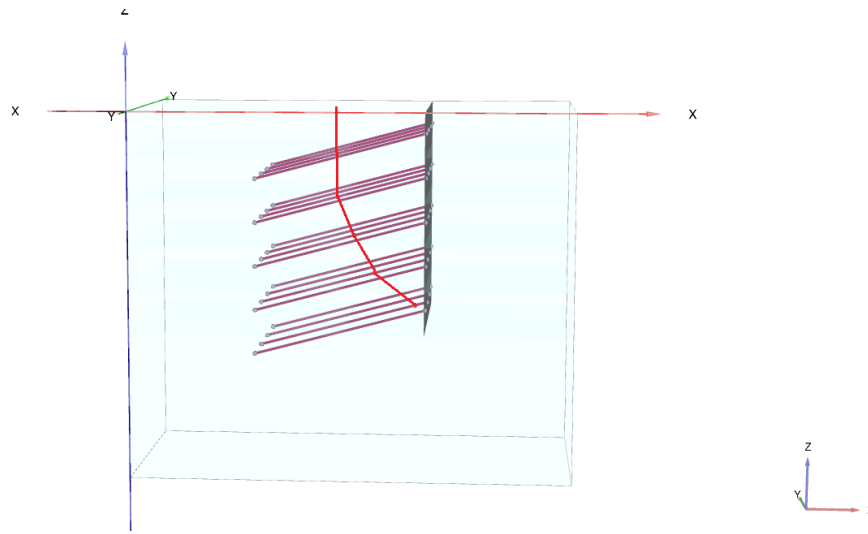


Figura 4.10: Possível superfície de ruptura para a análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 3D.

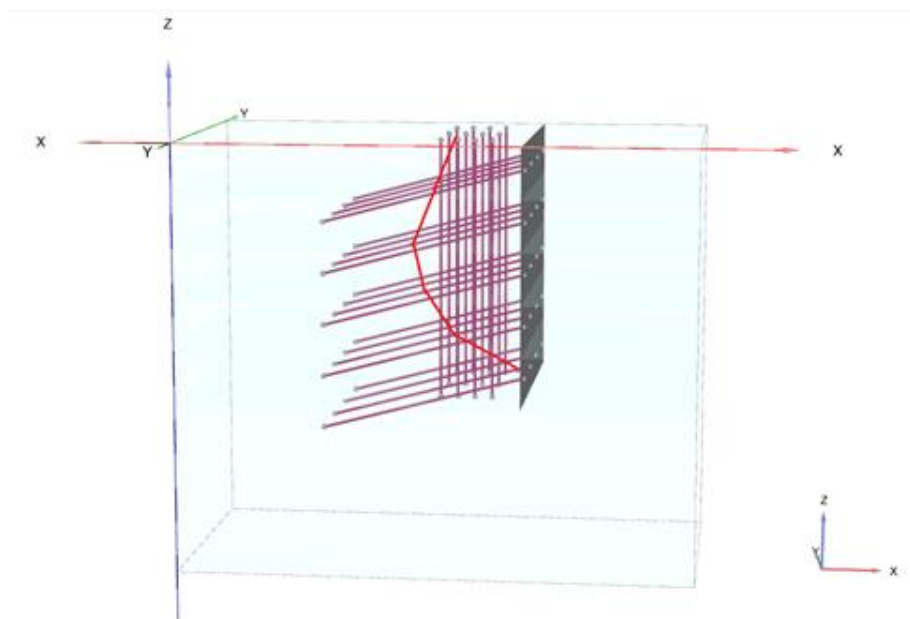


Figura 4.11: Possível superfície de ruptura para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 3D.

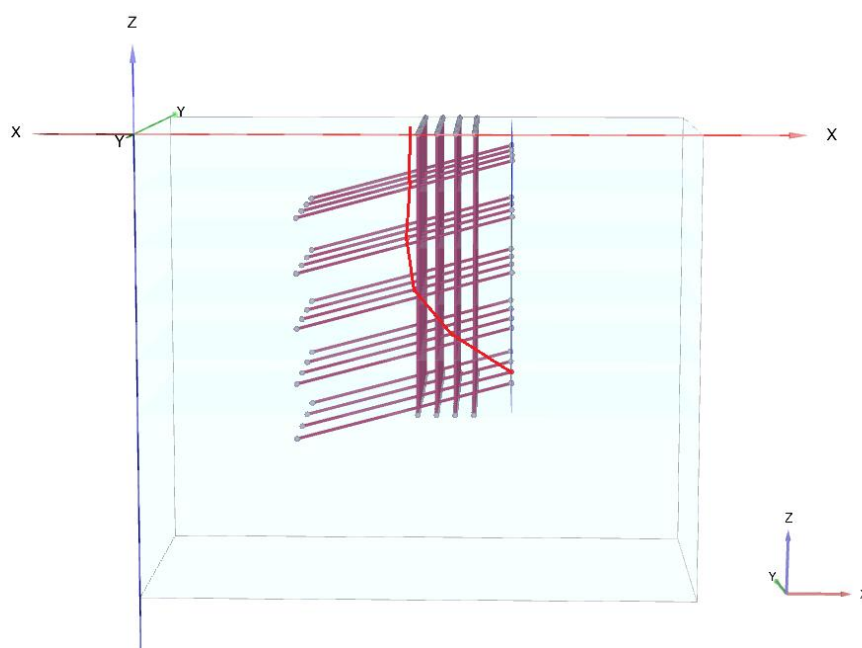


Figura 4.12: Possível superfície de ruptura para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 3D.

4.7. Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais

A seguir são apresentadas as magnitudes dos deslocamentos. A Figura 4.13 apresenta a magnitude dos deslocamentos para a análise sem utilização de grampos verticais, a Figura 4.14 para a análise com 4 grampos verticais espaçados horizontalmente em 2 m e a Figura 4.15 para a análise com 4 grampos verticais espaçados horizontalmente em 0,5 m. Nota-se que o uso do grampo vertical diminui e muito o deslocamento no topo da escavação. Se comparar a estrutura com maior densidade de grampos verticais (4 grampos e espaçamento de 0,5 m) e a estrutura sem o uso de grampos verticais, a porcentagem de quanto a deformação diminui é ainda maior.

Vale ressaltar que, os deslocamentos são altos no patamar de escavação porque o software restringe o movimento nos limites do bloco de solo criado. Na condição real, o solo não possui esta restrição do movimento, logo estas deformações se dissipam ao longo da massa de solo e, portanto, não aparecem com a magnitude encontrada pelo programa.

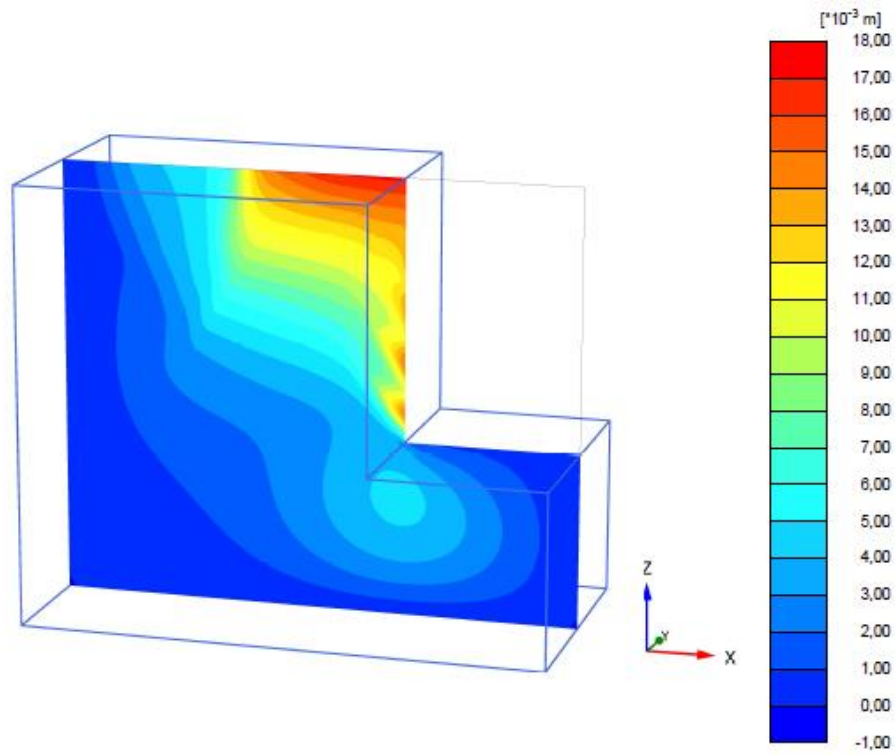


Figura 4.13: Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais para a análise 7,5_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 3D.

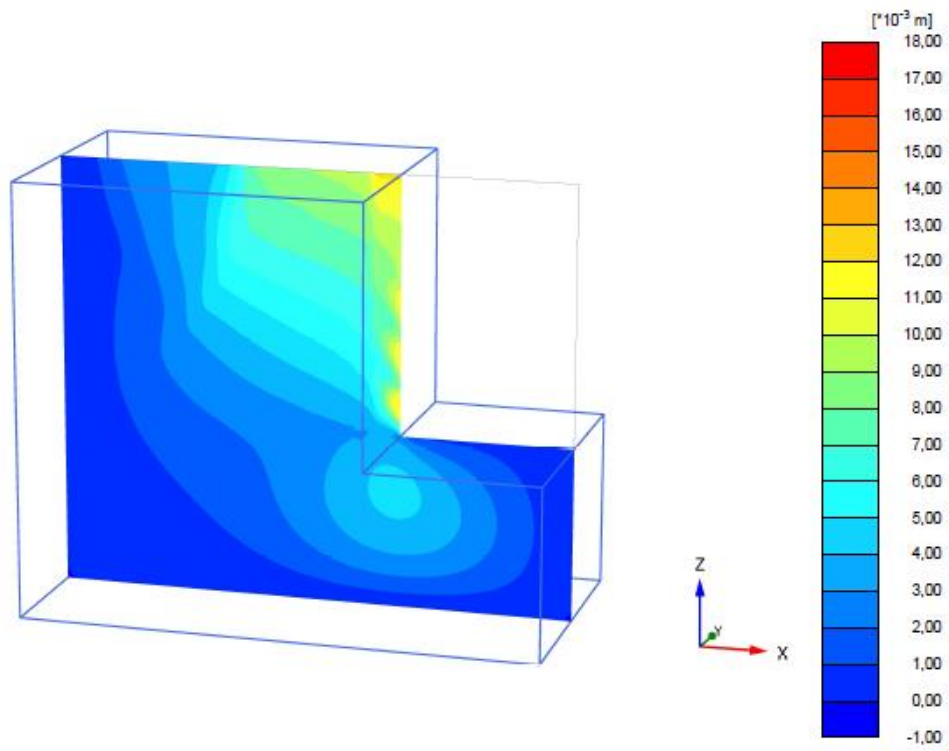


Figura 4.14: Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V2 para modelagem no Plaxis 3D.

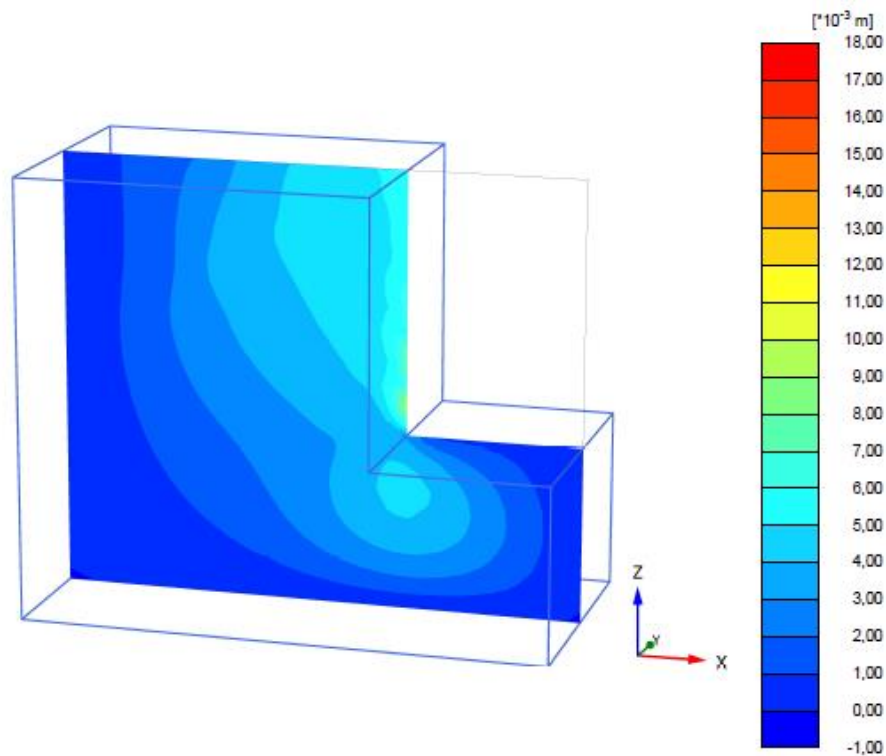


Figura 4.15: Distribuição da magnitude dos deslocamentos horizontais para a análise 7,5_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 3D.

4.8. Fator de segurança para escavação com altura igual a 9 m

Para que pudessem ser analisadas também estruturas com fator de segurança mais baixo, modelou-se uma estrutura com 9 m de altura de escavação sem o uso de grampos verticais (análise 9) e uma estrutura com 9 m de altura de escavação com o uso de 4 grampos verticais, sendo o espaçamento horizontal entre estes grampos verticais de 0,5 m (análise 10). Sendo assim, a Figura 4.16 apresenta os fatores de segurança encontrados para cada uma das modelagens dessas duas análises. Observa-se que para a modelagem no software Slide não houve diferença entre os fatores de segurança. No Plaxis 2D com o elemento plate houve um aumento pequeno de 3,7%. Já no Plaxis 3D o aumento foi maior, pois o uso de grampos verticais elevou o fator de segurança em 17%. No entanto, este ganho só foi conseguido com um número expressivo de grampos verticais (espaçamento horizontal de 0,5 m).

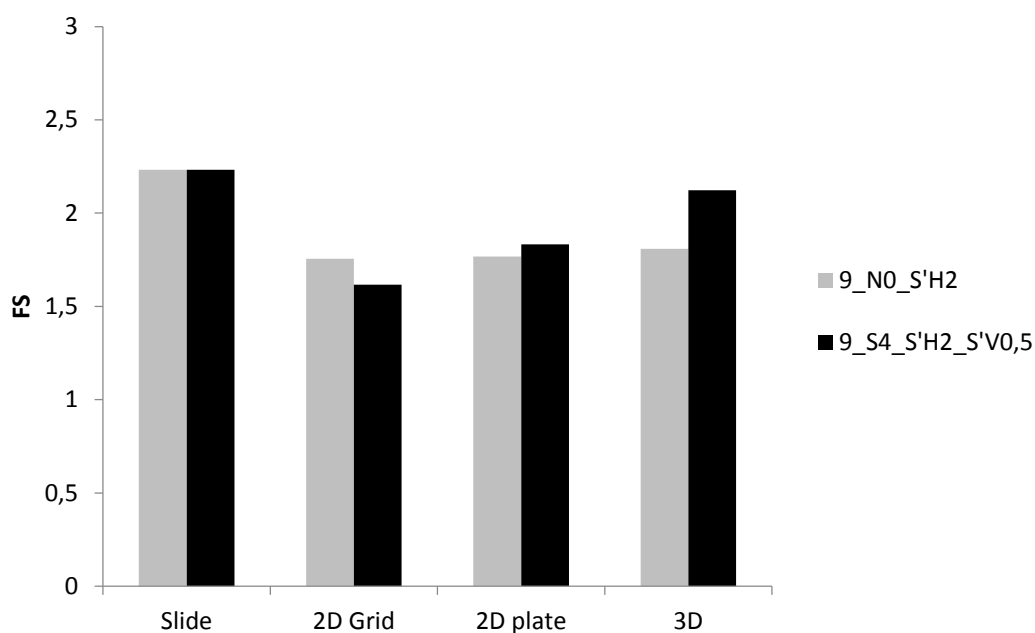


Figura 4.16: Fatores de segurança encontrados em cada software para as análises 9_N0_S'H2 e 9_S4_S'H2_S'V0,5.

4.9. Deslocamento horizontal na face para escavação com altura igual a 9m

O deslocamento horizontal da face no final da construção para a estrutura sem grampos verticais (análise 9) é apresentado na Figura 4.17. Já o deslocamento horizontal da face no final da construção para a estrutura com grampos verticais (análise 10) é apresentada na Figura 4.18. Comparando então as duas análises na modelagem 3D observa-se que, utilizando os grampos verticais, houve uma diminuição de 65,5% do deslocamento no topo da escavação. Já para a modelagem Plaxis 2D utilizando o elemento plate a diminuição foi de 45,6%. Porém para a modelagem Plaxis 2D utilizando o elemento geogrid, o deslocamento aumentou 64,5% com o uso de grampos verticais. Isso pode ter acontecido devido ao fato do elemento geogrid não considerar a rigidez a flexão, sendo assim ineficiente quanto à prevenção da ruptura e causar maiores deformações ao ser introduzido no maciço de solo.

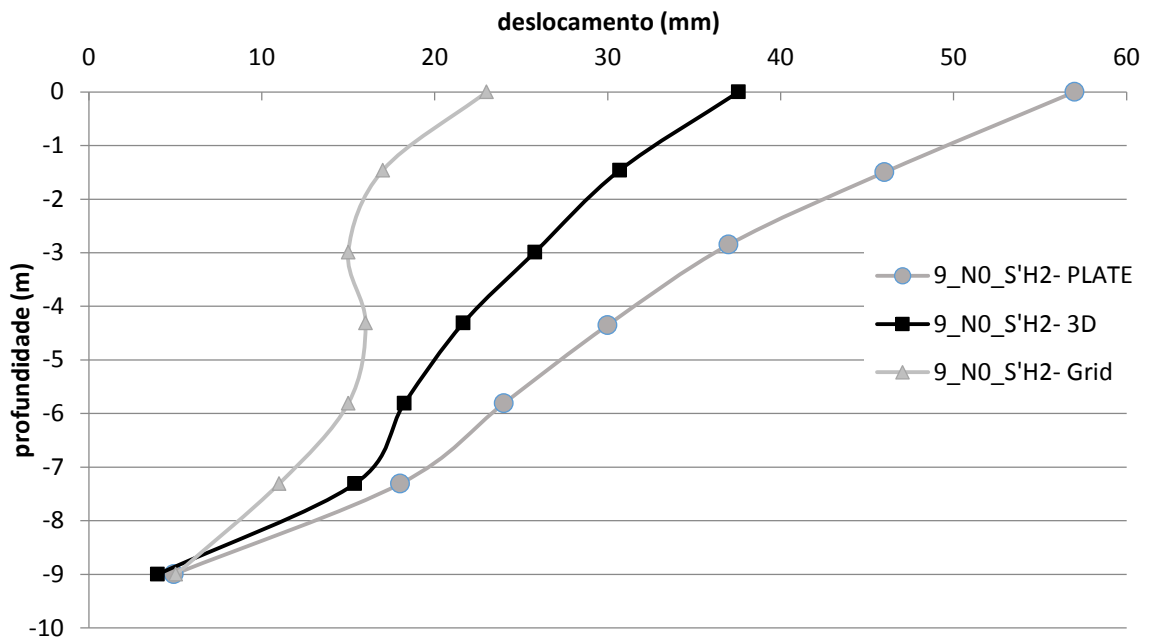


Figura 4.17: Deslocamento horizontal na face para a análise 9_N0_S'H2 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.

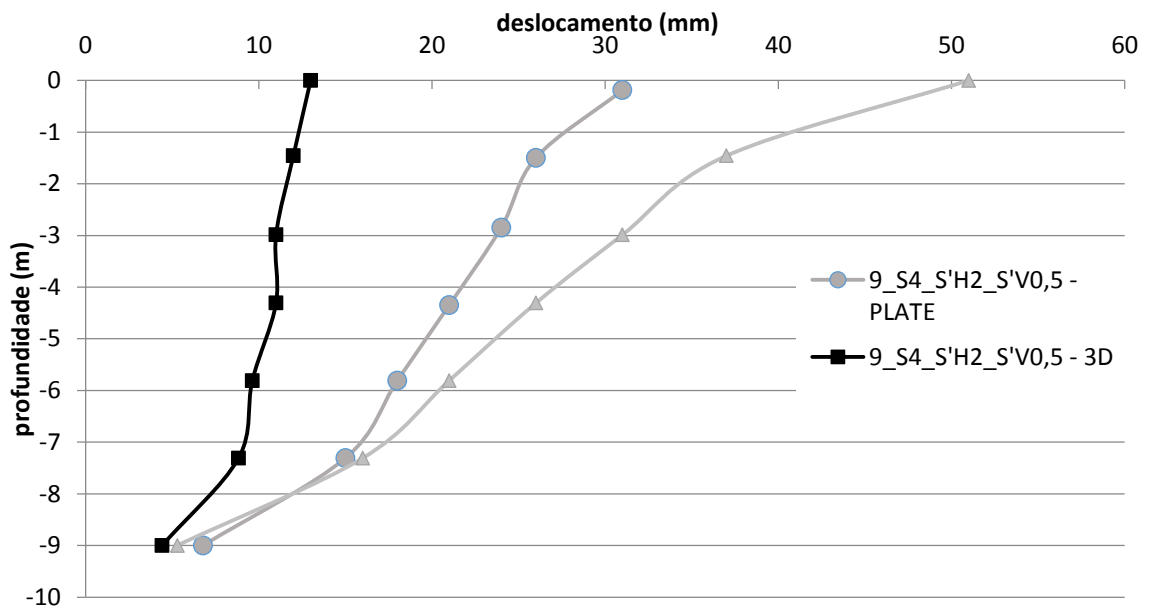


Figura 4.18: Deslocamento horizontal na face para a análise 9_S4_S'H2_S'V0,5 para modelagem no Plaxis 2D (plate e geogrid) e Plaxis 3D.

4.10. Somatório de trações máximas para escavação com altura igual a 9 m

A Figura 4.2 apresenta o somatório de trações máximas para as análises 9 e 10. Comparando a estrutura sem grampos verticais com a estrutura com grampos verticais, há uma redução no somatório de trações máximas dos 5 grampos horizontais para o modelo com grampos verticais, exceto para a modelagem 2D utilizando o elemento Geogrid. Esta diferença é de 22,6% para a modelagem 2D utilizando o elemento plate e 25,4% para a modelagem 3D.

Para atingir esta redução (análise 3D) também foi necessário o uso de um número expressivo de grampos verticais, ou seja, grampos espaçados horizontalmente de 0,5 m e em 4 linhas contando do grampo mais próximo à face aos mais afastado.

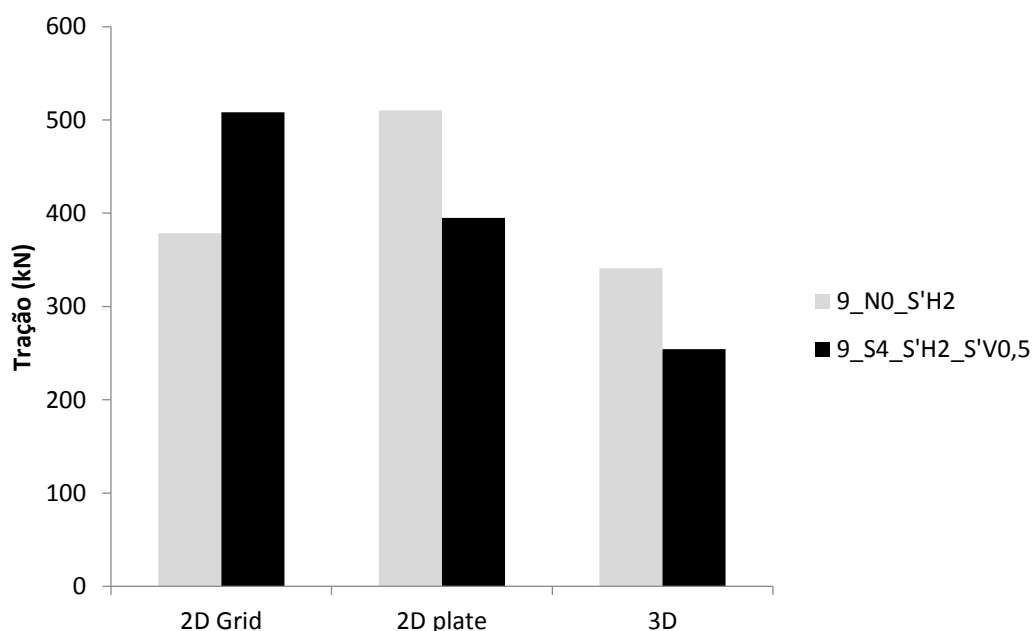


Figura 4.19: Somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais para análises 9_NO_S'H2 e 9_S4_S'H2_S'V0,5.

4.11. Análise com parâmetros do solo e rigidez relativa (S_i) reduzidos.

Dadas as estruturas com baixa rigidez relativa (S_i), é possível analisar se o comportamento dos resultados segue o mesmo padrão de comportamento das estruturas

analisadas, com alta rigidez relativa. A primeira análise é quanto ao fator de segurança. A Figura 4.20 apresenta os fatores encontrados para as 3 análises feitas em modelos com baixa rigidez relativa. Nota-se que assim como os grampos verticais colocados com espaçamento horizontal de 2 metros não contribuem significativamente para aumentar o fator de segurança nas estruturas rígidas, para a estrutura com baixa rigidez o comportamento se manteve: o fator de segurança encontrado para a estrutura com baixa rigidez e sem uso de grampos verticais foi aproximadamente igual ao fator de segurança encontrado para a estrutura com baixa rigidez e uso de grampos verticais espaçados horizontalmente em 2 metros. Porém quando os grampos verticais são colocados com espaçamento horizontal de 0,5 m, o fator de segurança aumenta 20%.

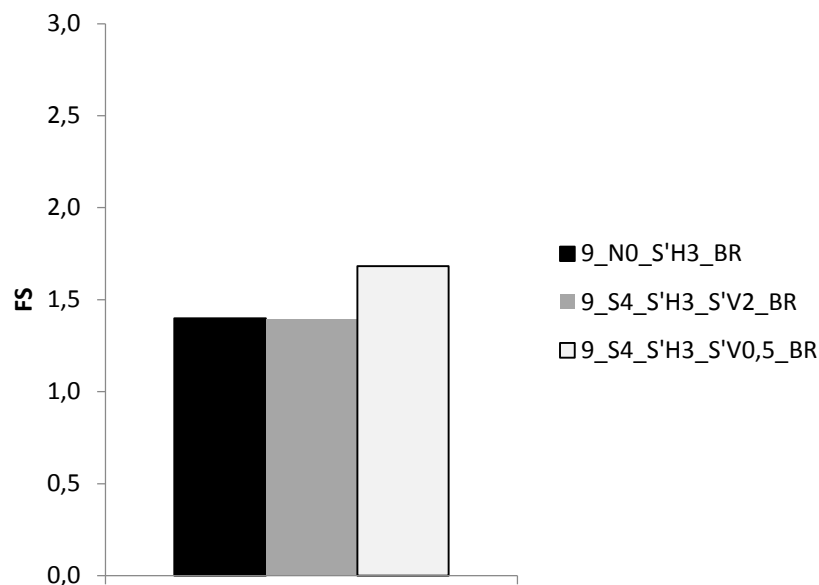


Figura 4.20: Fatores de segurança encontrados para as análises 9_N0_S'H3_BR, 9_S4_S'H3_S'V2_BR e 9_S4_S'H3_S'V0,5_BR

Os parâmetros do solo e o espaçamento horizontal utilizados nestes modelos configuram uma situação atípica e normalmente não utilizada na prática. Isto foi feito para que a estrutura tivesse a rigidez relativa bem inferior às demais análises feitas neste trabalho, e o comportamento dos resultados pudessem ser avaliados nestas duas situações (alta e baixa rigidez relativa). Neste caso, avaliando o deslocamento horizontal da face de escavação, nota-

se que este foi extremamente alto, pois, como dito, esta é uma situação atípica. A Figura 4.21 apresenta os deslocamentos para os 3 modelos.

Nota-se que com a utilização de grampos verticais espaçados horizontalmente em 2 m houve uma diminuição de 57,7% do deslocamento no topo da escavação. Já para o uso de grampos verticais espaçados horizontalmente em 0,5 m a diminuição de 83,3% do deslocamento no topo da escavação.

A eficiência do uso de grampos verticais cresce com a diminuição da rigidez do maciço. Observa-se, porém, que esta configuração (espaçamento horizontal dos grampos horizontais igual a 3 m e barra de 10 mm) não é utilizada para uma escavação de 9 m. Em vez de utilizar grampos verticais seria mais econômico diminuir o espaçamento horizontal dos grampos horizontais e aumentar o diâmetro da barra.

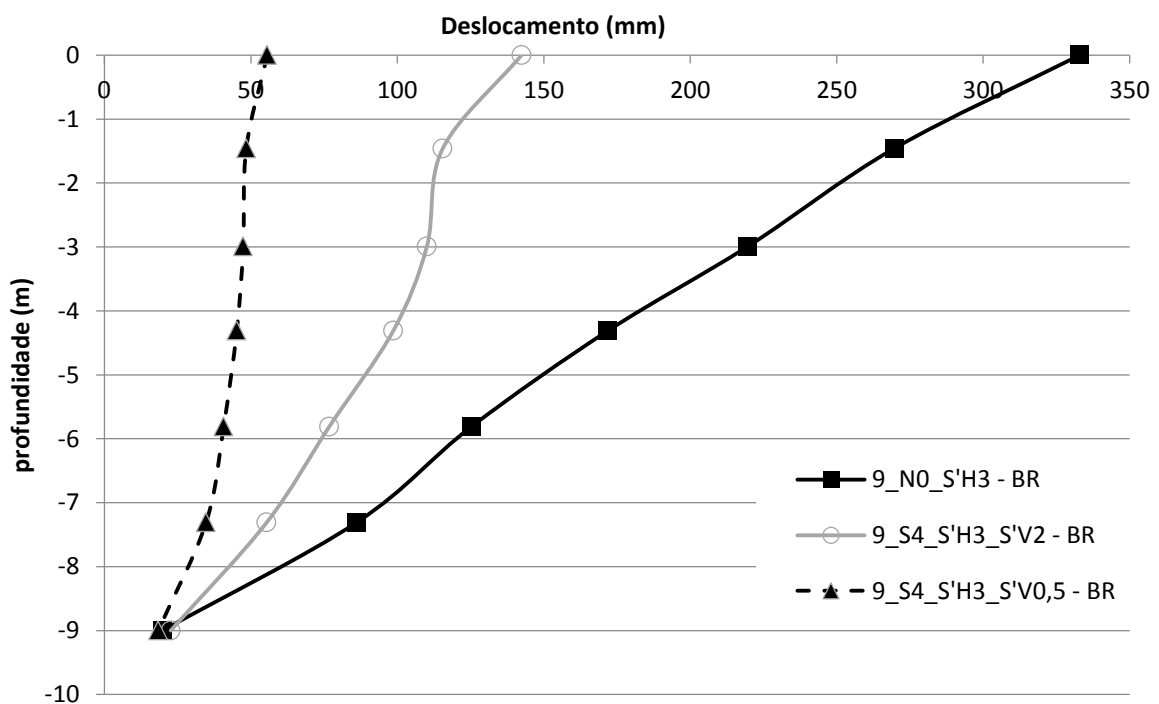


Figura 4.21: Deslocamentos na face da escavação para as análises 9_N0_S'H3_BR, 9_S4_S'H3_S'V2_BR e 9_S4_S'H3_S'V0,5_BR.

Comparando agora a estrutura de baixa rigidez sem grampos verticais com as estruturas de baixa rigidez com grampos verticais, há uma redução no somatório de trações máximas dos 6

grampos horizontais para o modelo com grampos verticais. Quando o espaçamento horizontal dos grampos verticais é de 2 metros a diminuição é de 47,7% na tração. Já quando o espaçamento horizontal dos grampos verticais é de 0,5 metros a diminuição é de 59% na tração.

Nota-se, porém, que os valores e tração máxima são altos, isso ocorre porque carga de trabalho utilizada na barra do grampo foi a tração máxima, e não a tração de plastificação, que é menor.

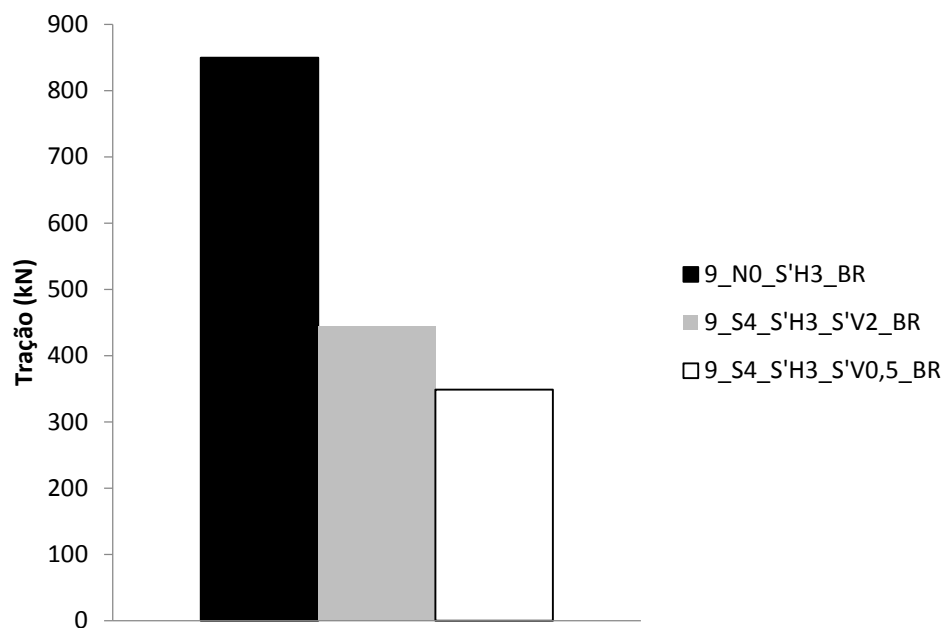


Figura 4.22: Somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais para análises 9_N0_S'H3_BR, 9_S4_S'H3_S'V2_BR e 9_S4_S'H3_S'V0,5_BR

4.12. Considerações sobre rigidez relativa

Considerando que a rigidez relativa é um ponto muito importante nas análises, foram calculadas a rigidez relativa de estruturas de solo grampeado realizadas no Brasil e apresentadas por Abramento et al. (2016). As obras possuem inclinações entre 80° e 90° e alturas entre 4 e 14 metros. Assim, diferentes valores de módulo de elasticidade do solo, ou

seja, 10MPa, 20MPa e 30 MPa foram adotados. Os resultados são apresentados na Figura 4.23.

Sabendo que as análises realizadas neste trabalho reproduzem estruturas com Si de 3.978, conforme a Tabela 3.12: Análises efetuadas pelo método dos elementos finitos plaxis 3D.Tabela 3.12 e que o módulo de elasticidade adotado para o solo foi de 30 MPa, percebe-se que a rigidez relativa dessas análises são realmente usuais.

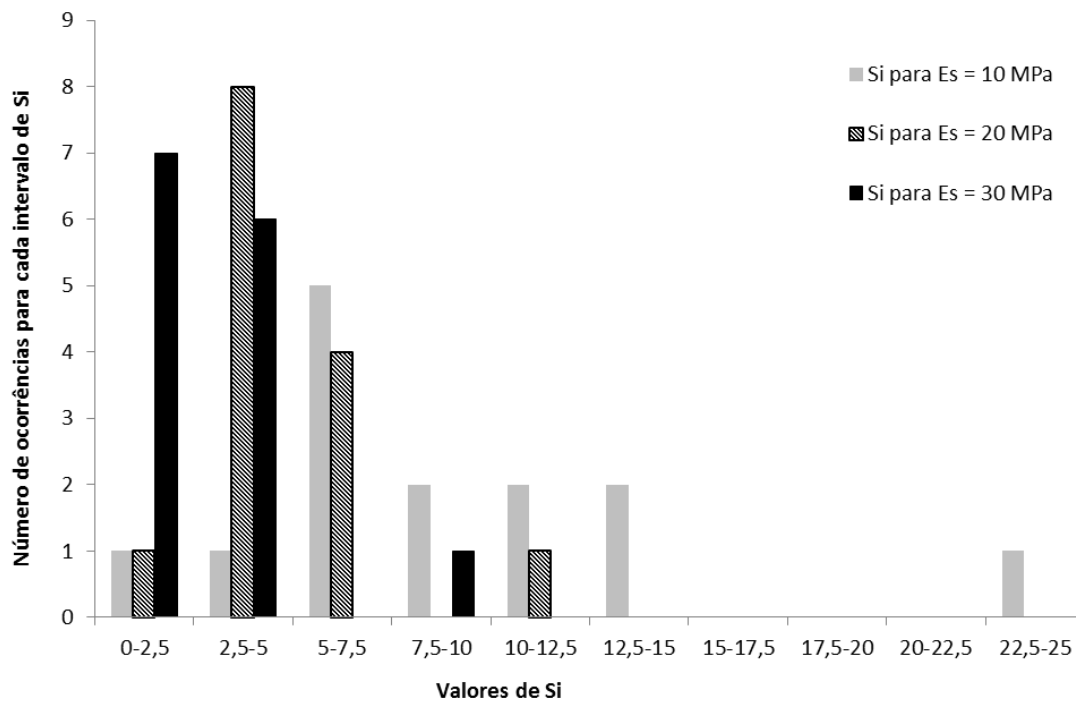


Figura 4.23: Resultados de rigidez relativa de obras realizadas no Brasil.

4.13. Resumo dos resultados

Apresentados graficamente alguns dos resultados neste capítulo e no apêndice deste trabalho, optou-se, para fins de obter um panorama geral dos resultados, uma tabela contendo

alguns resultados numéricos finais para cada uma das 10 análises realizadas e para cada uma das modelagens. A Tabela 4.1 é que apresenta estes resultados.

Tabela 4.1: Resumo contendo os resultados numéricos de todas as análises

Número	Análise	Fator de Segurança				Dh máx topo (mm)			Somatório de Trações (kN)		
		slide	2D grid	2D plate	3D	2D grid	2D plate	3D	2D grid	2D plate	3D
1	7,5_NO_S'H2	2,49	2,09	2,08	2,10	21,0	28,0	17,0	297	307	205
2	7,5_S2_S'H2_S'V2	2,49	2,06	2,08	2,09	23,0	16,0	13,0	313	251	171
3	7,5_S3_S'H2_S'V2	2,49	2,08	2,08	2,09	22,0	16,0	12,5	303	246	164
4	7,5_S4_S'H2_S'V2	2,49	2,07	2,06	2,09	22,0	17,0	12,5	308	250	159
5	7,5_S2_S'H2_S'V0,5	2,49	2,06	2,08	2,37	23,0	14,0	5,8	311	286	162
6	7,5_S3_S'H2_S'V0,5	2,49	2,05	2,06	2,22	22,0	16,0	7,0	313	244	158
7	7,5_S4_S'H2_S'V0,5	2,49	2,06	2,05	2,37	23,0	17,0	6,1	318	247	165
8	6_NO_S'H2	2,88	2,41	2,40	2,44	7,7	10,0	6,4	159	164	107
9	6_S4_S'H2_S'V0,5	2,88	2,42	2,37	2,64	6,7	5,6	2,5	170	147	85
10	9_NO_S'H2	2,23	1,76	1,77	1,81	31,0	57,0	37,6	481	510	341
11	9_S4_S'H2_S'V0,5	2,23	1,62	1,83	2,12	51,0	31,0	13,0	508	395	254
12	9_NO_S'H3_BR	-	-	-	1,40	-	-	333,3	-	-	850
13	9_S4_S'H3_S'V2_BR	-	-	-	1,40	-	-	142,4	-	-	445
14	9_S4_S'H3_S'V0,5_BR	-	-	-	1,68	-	-	55,6	-	-	349

5. Conclusões

5.1. Quanto à modelagem

Como dito na metodologia da pesquisa, o software Plaxis 2D não possui um elemento que represente fielmente as propriedades do grampo na realidade, necessitando, portanto, de adaptações, diferentemente do software em 3D, que possui este elemento. Portanto, para que este seja modelado no software 2D o elemento grampo foi modelado como equivalente a dois elementos diferentes: elemento geogrid e elemento plate.

Nota-se que, o modelo com o elemento plate se aproxima muito mais dos resultados dos modelos em 3D do que o modelo com o elemento geogrid, pois tanto o plaxis 3D quanto o Plaxis 2D com elemento plate considera a rigidez à flexão do grampo. Logo, ao modelar uma estrutura de solo grampeado em plaxis 2D, deve-se optar por modelar o grampo como elemento plate, realizando os cálculos corretos para que as propriedades sejam equivalentes ao grampo na realidade.

5.2. Quanto ao Fator de Segurança

Tanto para a estrutura de 7,5 metros de altura de escavação quanto para a estrutura de 9 metros, só há aumento considerável do fator de segurança na modelagem 3D, quando se compara a estrutura que utiliza somente grampos sub-horizontais com a estrutura que utiliza além dos grampos sub-horizontais, 4 linhas de grampos verticais espaçados horizontalmente de 0,5 m. Ou seja, para que efetivamente o grampo vertical contribua para aumentar o fator de segurança da estrutura uma quantidade muito grande de grampos verticais deve ser utilizada. Portanto, a efetividade do uso de grampos verticais na estrutura quanto ao fator de segurança é baixa. Conclui-se então que, a utilização de grampos verticais não contribui consideravelmente para aumentar o fator de segurança da estrutura.

5.3. Quanto à tração máxima nos grampos sub-horizontais

Analisando as somas das trações máximas encontradas nos grampos sub-horizontais, percebe-se que, tanto para 9 metros de escavação quanto para 7,5 metros, o uso de grampos verticais diminui o somatório de trações máximas nos grampos sub-horizontais em cerca de 25% e 20%, respectivamente, quando comparada a estrutura que não utiliza os grampos verticais. Portanto a utilização de grampos verticais diminui a tração máxima nos grampos sub-horizontais.

5.4. Quanto ao deslocamento horizontal na face

Na estrutura com escavação de 7,5 metros utilizando 4 grampos verticais com espaçamento de 2 metros a redução é de 26 %, aproximadamente. Quando o espaçamento horizontal diminui para 0,5 metros então a redução é ainda maior, 64%, ambas em modelagem 3D e no topo da escavação. Ou seja, é notório que o grampo vertical tem alta efetividade quanto a diminuição do deslocamento horizontal no topo da estrutura.

Quando se analisa o deslocamento horizontal na face da escavação de 9 metros e 4 grampos espaçados horizontalmente em 0,5 metros, tem-se uma redução de 65,5 % na modelagem 3D e 45,6% na modelagem 2D utilizando o elemento plaxis.

Em ambas as alturas de escavação a diferença as estruturas com e sem grampo vertical diminui à medida que se aproxima da base da escavação, chegando a ser próxima de zero na base da escavação.

5.5. Quanto à relação entre deslocamento vertical e horizontal no topo da escavação

Assim como Clouterre (1991), os deslocamentos verticais e horizontais no topo da escavação mantiveram uma relação próxima da linearidade independente da existência ou não de grampos verticais, e da quantidade utilizada de grampos verticais em cada estrutura. É bem notável que na estrutura em que não foram utilizados os grampos verticais, em todas as modelagens, como os deslocamentos no topo são maiores, a relação fica mais próxima de 1, ou seja, o deslocamento horizontal fica bem próximo do deslocamento vertical. Já quando se

utilizam os grampos verticais, os deslocamentos diminuem e esta relação fica mais distante de 1.

5.6. Quanto à superfície de ruptura

Traçadas linhas interligando os pontos de tração máxima nos grampos sub-horizontais, originou-se uma superfície potencial de ruptura. Analisando os modelos com e sem grampos verticais, nota-se que os grampos verticais aproximam a tração máxima do primeiro grampo sub-horizantal da face da escavação. Nos demais grampos, os pontos onde ocorrem a tração máxima permanecem próximos de onde eram na estrutura sem grampos verticais. Essa aproximação ocorreu por conta do aumento da rigidez na face ocasionada pela inclusão dos grampos verticais.

5.7. Quanto às estruturas de baixa rigidez

Como já era previsto, as mesmas conclusões que se obteve nas estruturas com alta rigidez obtém-se também nas estruturas com baixa rigidez. O deslocamento no topo e a soma das trações máximas nos grampos sub-horizontais diminuíram consideravelmente (60% a 80% para os deslocamentos no topo e 50% na soma das trações) com o uso dos grampos verticais.

O fator de segurança aumentou em 20% quando usando grampos verticais espaçados horizontalmente em 0,5 metros. Ou seja, para que haja alguma efetividade, a quantidade de grampos verticais utilizados deve ser muito grande, o que pode levar ao questionamento da utilidade dos mesmos, pois uma grande quantidade de grampos leva a um aumento considerável nos custos da obra.

5.8. Quanto à eficiência dos grampos verticais

Observou-se que ganhos significativos em termos de aumento do fator de segurança, redução de deslocamentos horizontais e diminuição na tração dos grampos horizontais só ocorreram para uma densidade excessiva de grampos verticais (4 linhas da face para o interior do maciço e espaçamento horizontal de 0,5 m). Dessa forma é economicamente mais viável

diminuir o espaçamento dos grampos horizontais ou aumentar o diâmetro da barra, caso seja desejado que as deformações diminuam e o fator de segurança aumente.

5.9. Sugestões para pesquisas futuras

A verificação da eficiência do uso dos grampos verticais não é muito comum em pesquisas científicas. No presente trabalho, a eficiência dos grampos foi analisada com base em modelos numéricos. Este tipo de análise poderia ser feito através do monitoramento de estruturas reais, ou estudo em modelos físicos em laboratório. Pode-se também avaliar o quão econômico é um projeto mais rígido (com menores espaçamentos e maior diâmetro do grampo e da barra) que seja composto apenas por grampos sub-horizontais comparado a um projeto menos rígido que aquele, mas onde são utilizados grampos verticais.

Referências

- ABRAMENTO, M, ZIRLIS, A, C., EHRLICH, M.. **Reforço do terreno**. 2016. n: Falconi, Frederico et al. **Fundações Teoria e prática**. 3ª. ed. São Paulo: 2016. cap. 16, p. 641-684.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de Encosta. Rio de Janeiro, 2009, 33p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629**: Execução de Tirantes ancorados no Terreno. Rio de Janeiro, 2006, 32p.
- BRINKGREVE, R. B. J.; AL-KHOURY, R.; BAKKER, K. J.; BONNIER, P.G.; BRAND, P. J. W.; BROERE, W.; BURD, H. J.; SOLTYS, G.; VERMEER, P. A.. 2002. Plaxis v.8: finite element code for soil and rock analysis. **Manuais**. Delft (Holanda): Universidade Técnica de Delft e PLAXIS b. v.2.8
- CARTIER, G., GIGAN, J. P., 1983, **Experiments and observations on soil nailing structures**. In: Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics 220 and Foundation Engineering (ECSMFE), v. 2, Helsinki, Finland, May. Edited by H.G. Rathmayer, K.H.O. Saari, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 473-476.
- EHRLICH, M., SILVA, R.C., 2015, **Behavior of a 31 m high excavation supported by anchoring and nailing in residual soil of gneiss**. Engineering Geology 191 - Elsevier, Março, pp. 48-60.
- CLOUTERRE, RECOMMENDATIONS CLOUTERRE.. **Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing (English translation)**. 1991. Scientific Committee of the French National Project Clouterre, ENPC, Paris, France. In: Report FHWA-SA-93- 026, U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, July. Editedby F. Schlosser.
- DUNCAN, J. M., BYRNE, P., WONG, K. S., strength, stress-strainand bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. **Journal of Geotechnical Engineering**, Report UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, California, 1980.
- DYER, N.R., MILLIGAN, G.W.E.. A photoelastic investigation of the interaction of a cohesion less soil with reinforcement place dat different orientations.IN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IN SITU SOILAND ROCK REINFORCEMENT. Paris, 1984. **Proceedings**. pp. 257- 262.
- EHRLICH, M., ALMEIDA, M. S. S. e LIMA, A. M. L. Parametric numerical analysis of soil nailing systems. IN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT. Fukuoka, Japão, 1996. **Proceedings**. November, pp. 747-752.

EHRlich, M., MITCHELL, J. K.. Working stress design method for reinforced soil walls, **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 4 (April), pp. 625-645. 1994.

EHRlich, M., SILVA, L. F. M.. Sistemas de contenção de solos reforçados, In: I CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), ABMS, Rio de Janeiro, 1992. **Anais**. Novembro, vol. 1, pp. 35-45.

EHRlich, M.. solos grampeados comportamento e procedimentos de análise. Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento In: WORKSHOP SOBRE SOLO GRAMPEADO, São Paulo, 2003. **Anais**. Outubro, pp. 127-137.

EHRlich, M.; ZIRLIS, A. C.. Reforço do terreno: Solo grampeado. In: FALCONI, FREDERICO ET AL. **Fundações Teoria e prática**. 3ª. ed. São Paulo: Pini ABMS/ABEF, 2016. cap. 16, p. 641-684. v. 1.

FEIJÓ, R. L., EHRlich, M.. Resultados de ensaios de arrancamento em grampos injetados em dois pontos do município do rio de janeiro. In: III CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), Rio de Janeiro, 2001. **Anais**. Novembro. v. único, pp. 517-524.

FEIJÓ, R. L., EHRlich, M.. Resultados do monitoramento de uma obra experimental em solo grampeado. In: **Anais** da IV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), Salvador, Setembro de 2005, v. 2, pp. 633-642.

FEIJÓ, R. L.. **Monitoração de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnáissico não saturado**. 2007. 176 f. Tese (Doutorado em engenharia civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GEORIO. **Manual técnico de encostas**. 2014. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro - GEORIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GUILLOUX, A., JAILLOUX, J. M.. Comportement d'un mur experimental em terre armeer vis-a-vis de la corrosion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCED EARTH AND OTHER TECHNIQUES, Paris, 1979. **Proceedings**. v. 2, pp. 503-508.

JEWELL, R.A.. **Some effects of reinforcement on the mechanical behavior of soils**. 1980. Thesis (Doctor of Philosophy), Cambridge University.

LAZARTE, C. A., ELIAS, V., ESPINOZA, R. D., SABATINI, P. J.. Soil Nail Walls. March. In: REPORT FHWA0-IF-03-017, **Geotechnical Engineering Circular**, n. 7, 2003, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.

LIMA, A. M. L.. **Análise numérica do comportamento de solos grampeados**. 1996. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIMA, A. P.. **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado**. 2002. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MITCHELL, J. K., VILLET, W. C. B.. Reinforcement of earth slopes and embankments. In: REPORT NCHRP, 290, 1987, U.S.A. **Proceedings**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA, June.

PROTENDIDOS DYWIDAG LTDA, 2017. Sistemas de Protensão com Barras Dywidag. Aplicações Geotécnicas. **Catálogo**. São Paulo/SP.

RAWAT, S., GUPTA, A. K.. Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods, **International Journal of Geosynthetic sand Ground Engineering**, Springer, Suíça, 2016, 23 p.

SANDRONI, S. S.. Young metamorphic residual soil. GENERAL REPORT, 1991. **Proceedings**, 9 th. Panamerican CSMFE, Viña del mar, vol. 4, pp 1771-1788.

SCHLOSSER, F., GUILLOUX, A.. Soil nailing: practical applications. In: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES, Bangkok, 1982. **Proceedings**, vol. 29, p. 389-397.

SILVA, F. M.. **Monitoração de uma escavação grampeada com face rígida realizada em aterro rodoviário**. 2015. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, M. J. F.. **Análise de estabilidades de taludes pelo método de equilíbrio limite geral**. 2013. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

SILVA, R. C.. **Comportamento de uma escavação com cortina ancorada e grampeamento em solo residual com camadas reliquiárias**. 210 p. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

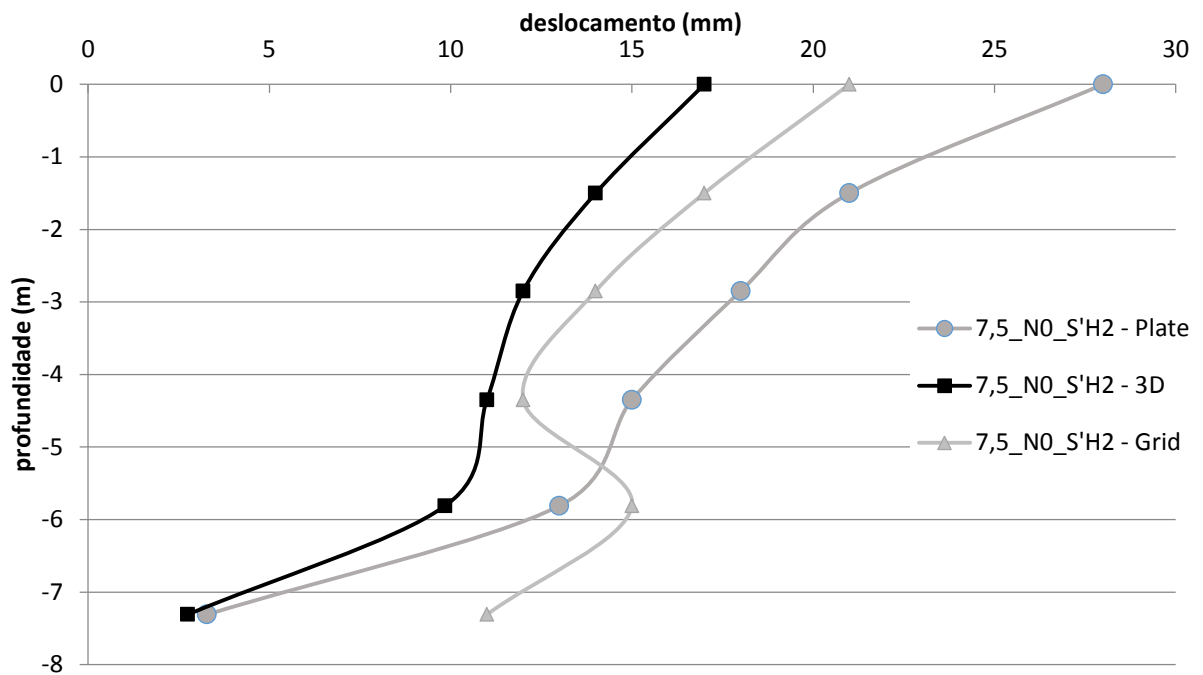
SPRINGER, F. O.. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaise**. 310 p. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

STOCKER, M. F., KORBER, G.W., GASSLER, G., GUDEHUS, G.. Soil nailing: loutage du sol. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT: REINFORCE DEAR THANDO THER TECHNIQUES, 1979, Paris, France. **Proceedings**. Ecoledes PontsetChaussées, v. 2, pp. 463-474.

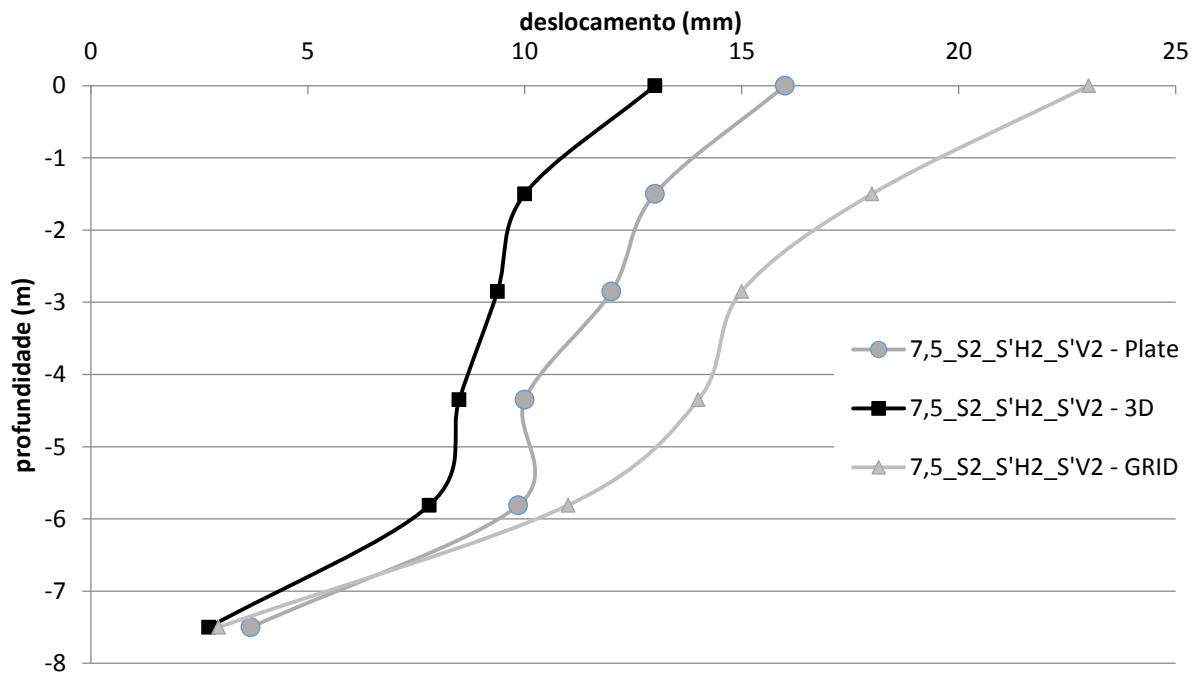
VELOSO, D. A., LOPES, F. R.. **Fundações**. 1996, Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. v. 1. p.111-157.

Apêndice A – Deslocamento horizontal versus Profundidade

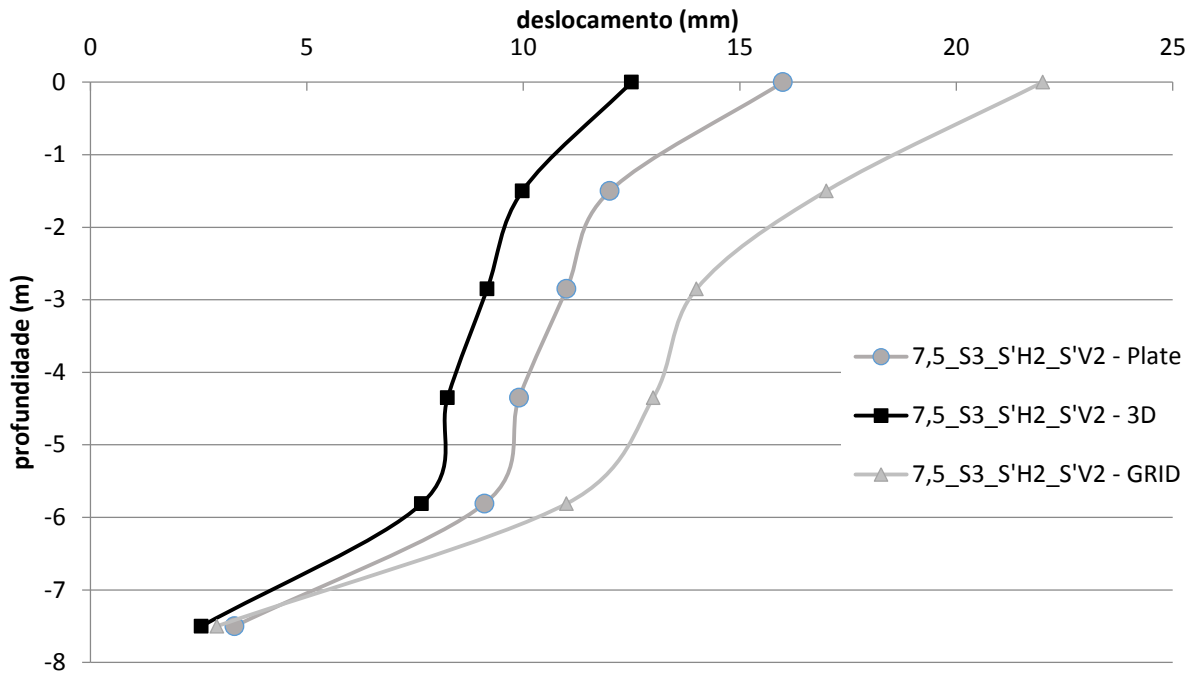
- Análise 1 – 7,5_N0_S'H2



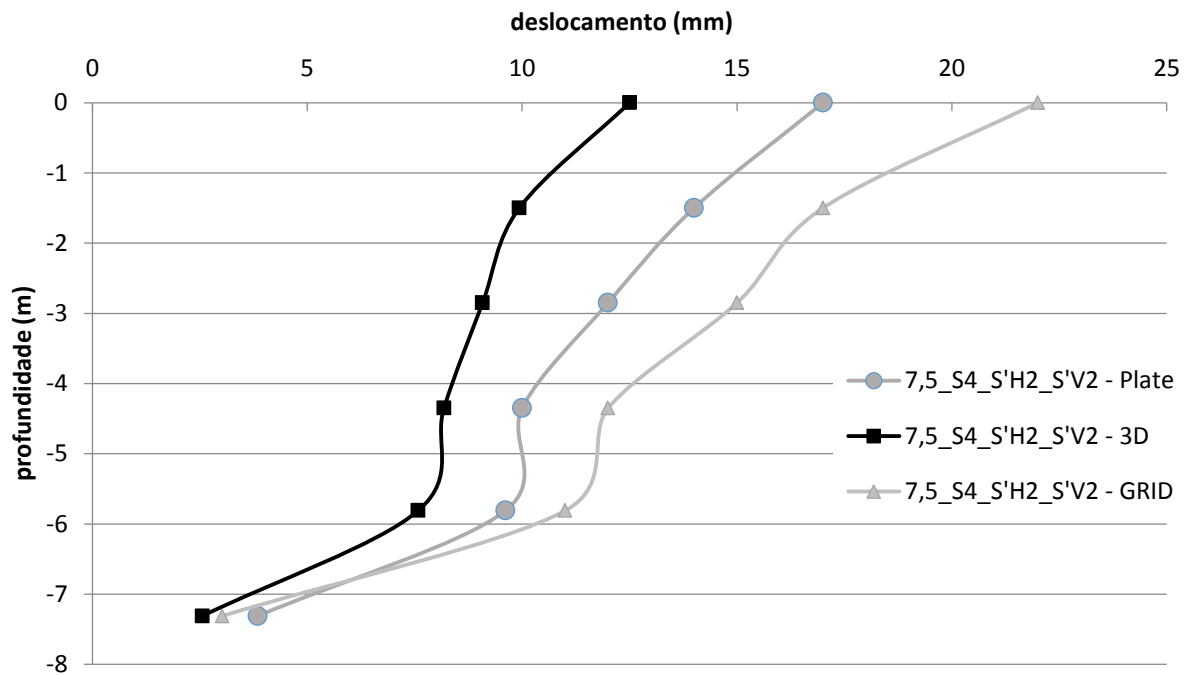
- Análise 2 – 7,5_S2_S'H2_S'V2



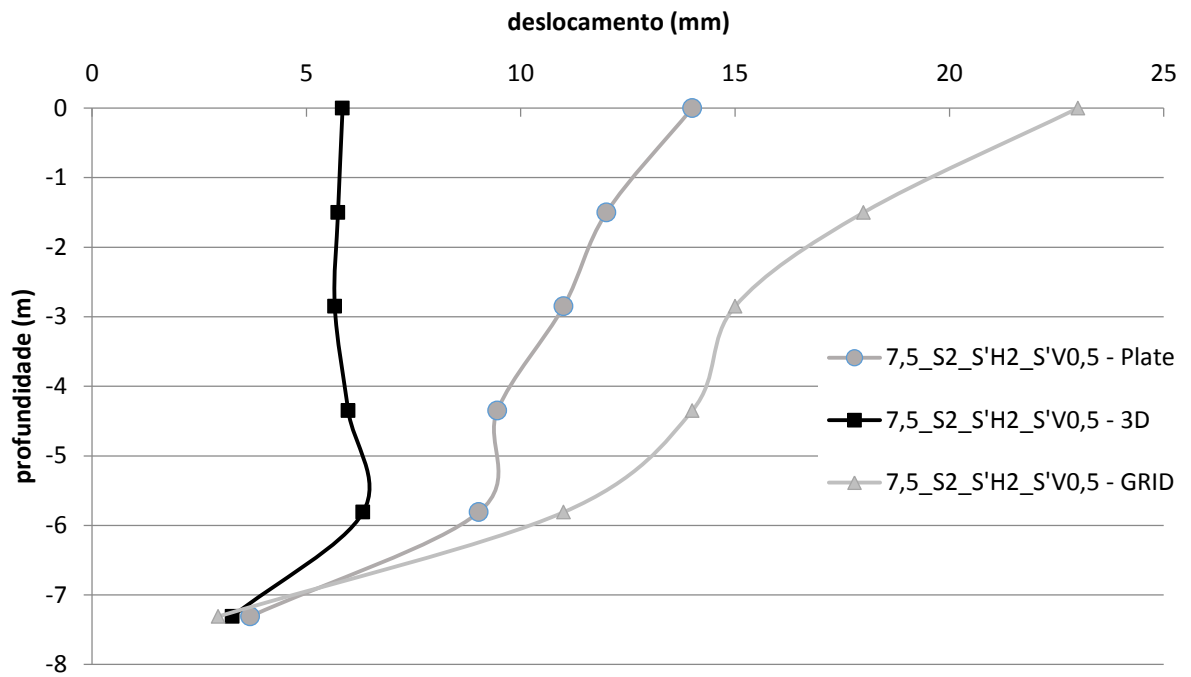
- Análise 3 - 7,5_S3_S'H2_S'V2



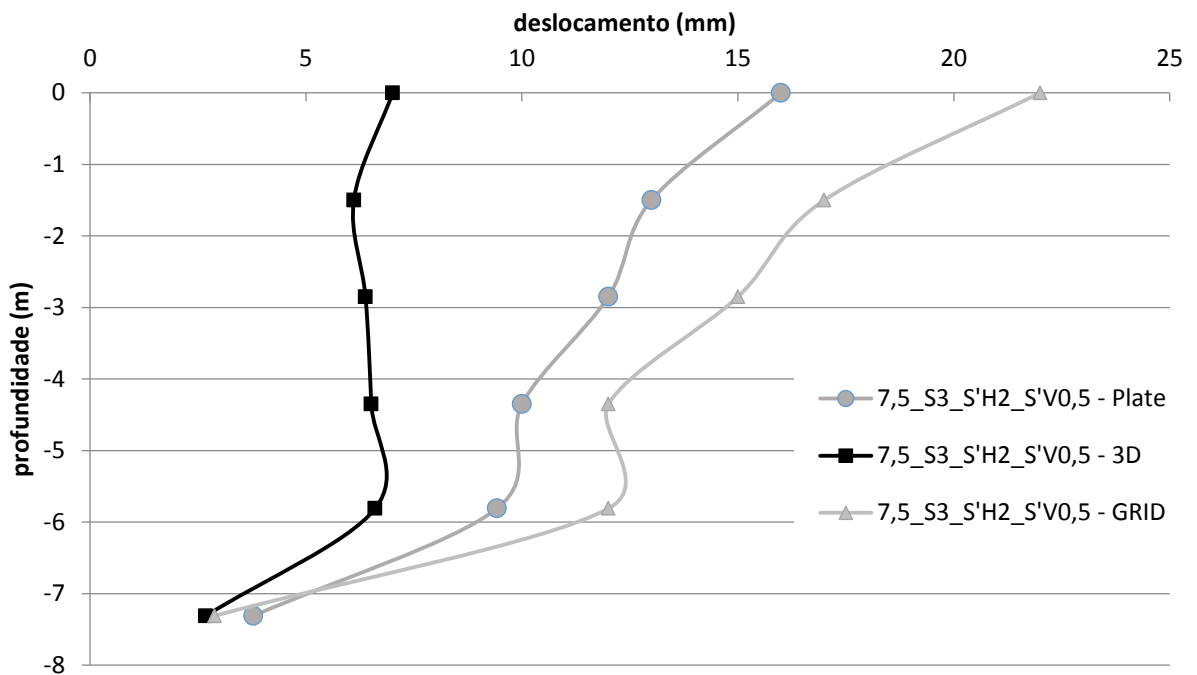
- Análise 4 - 7,5_S4_S'H2_S'V2



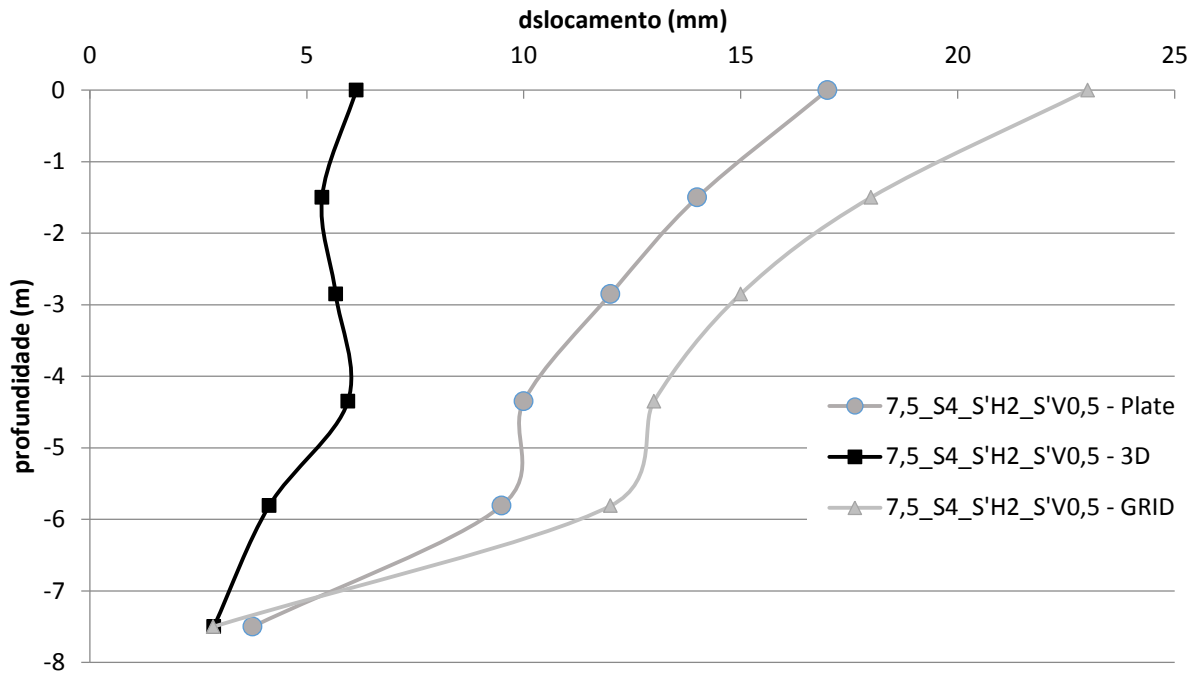
- Análise 5 - 7,5_S2_S'H2_S'V0,5



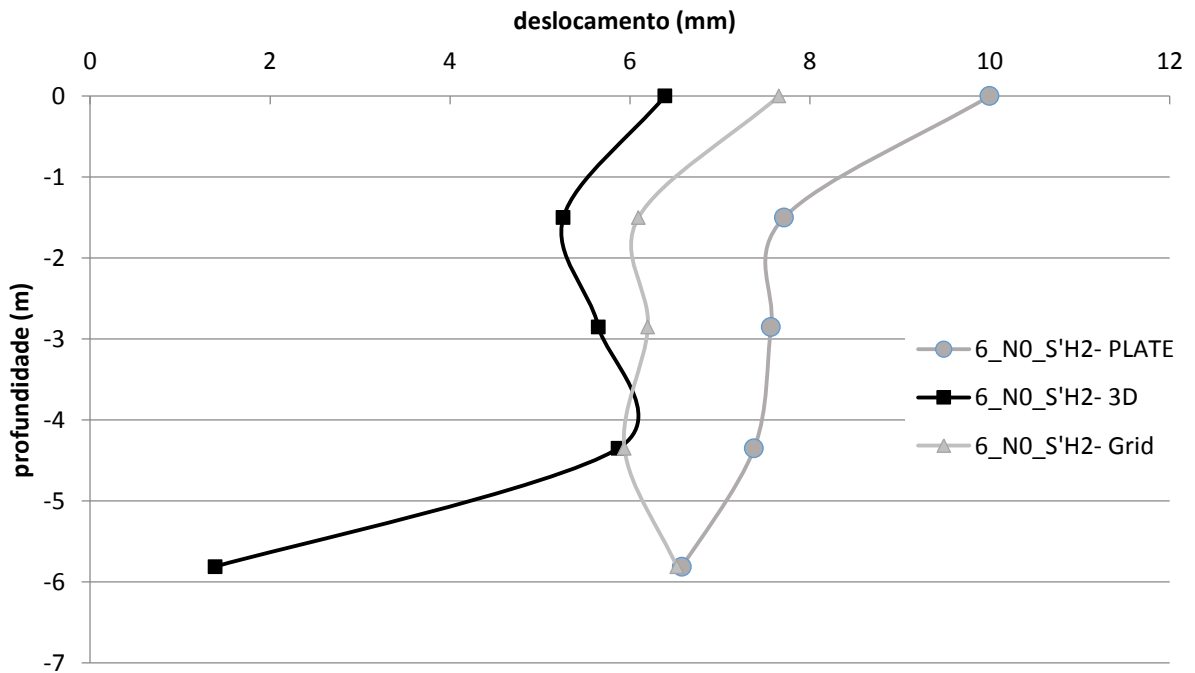
- Análise 6 - 7,5_S3_S'H2_S'V0,5



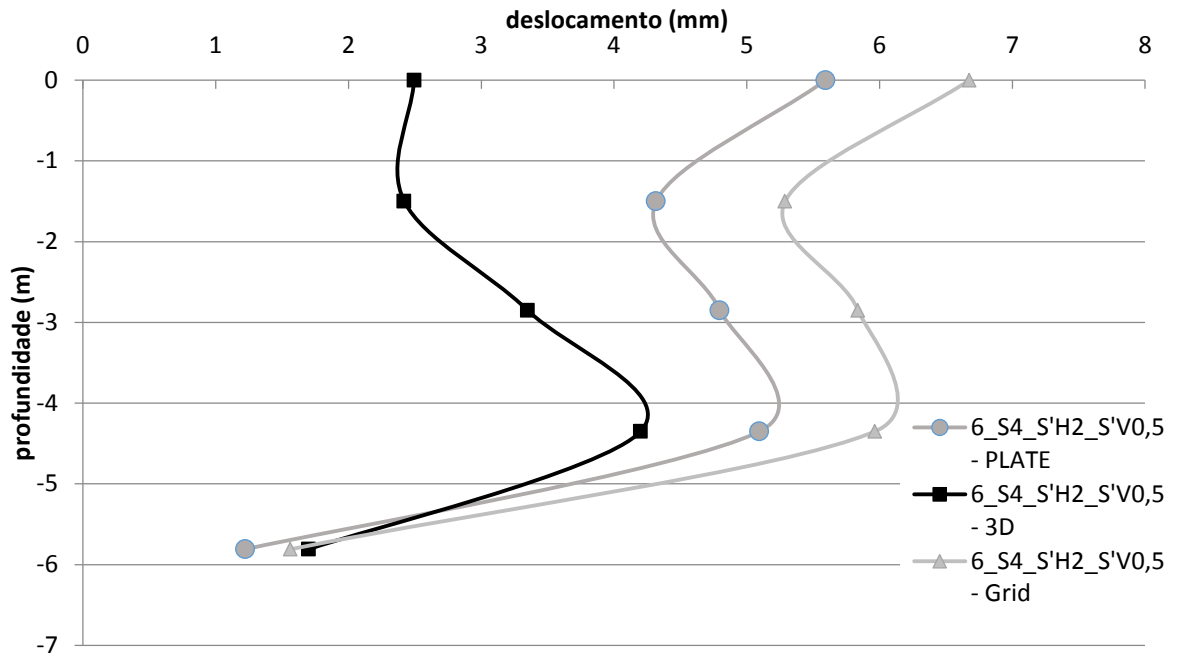
- Análise 7 - 7,5_S4_S'H2_S'V0,5



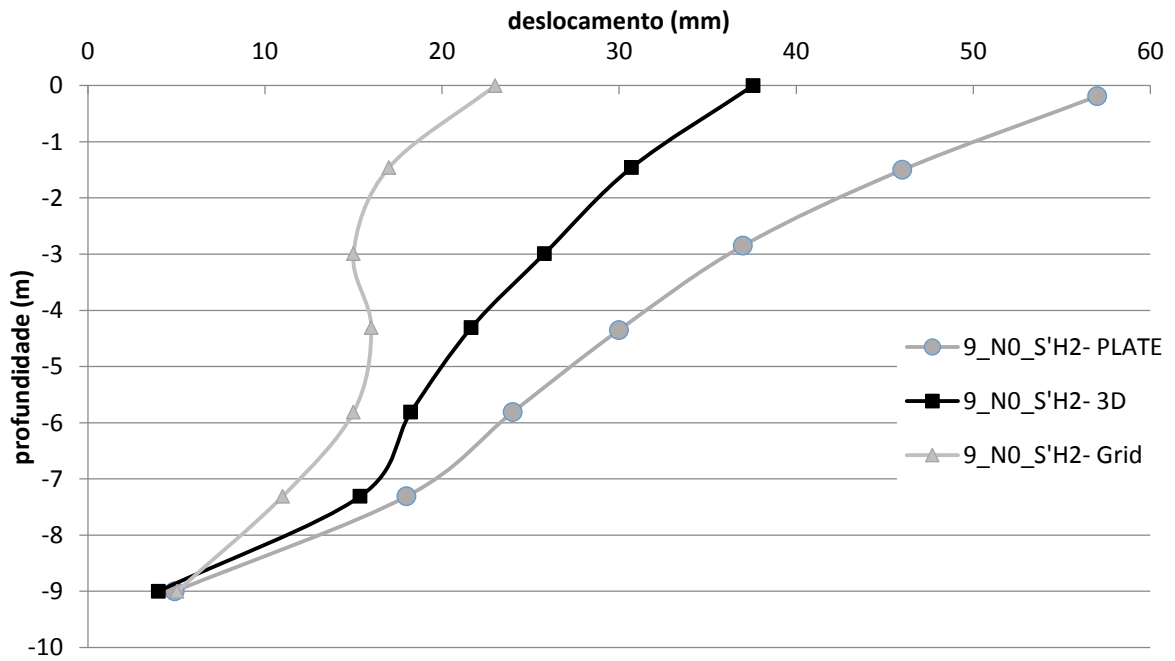
- Análise 8 - 6_NO_S'H2



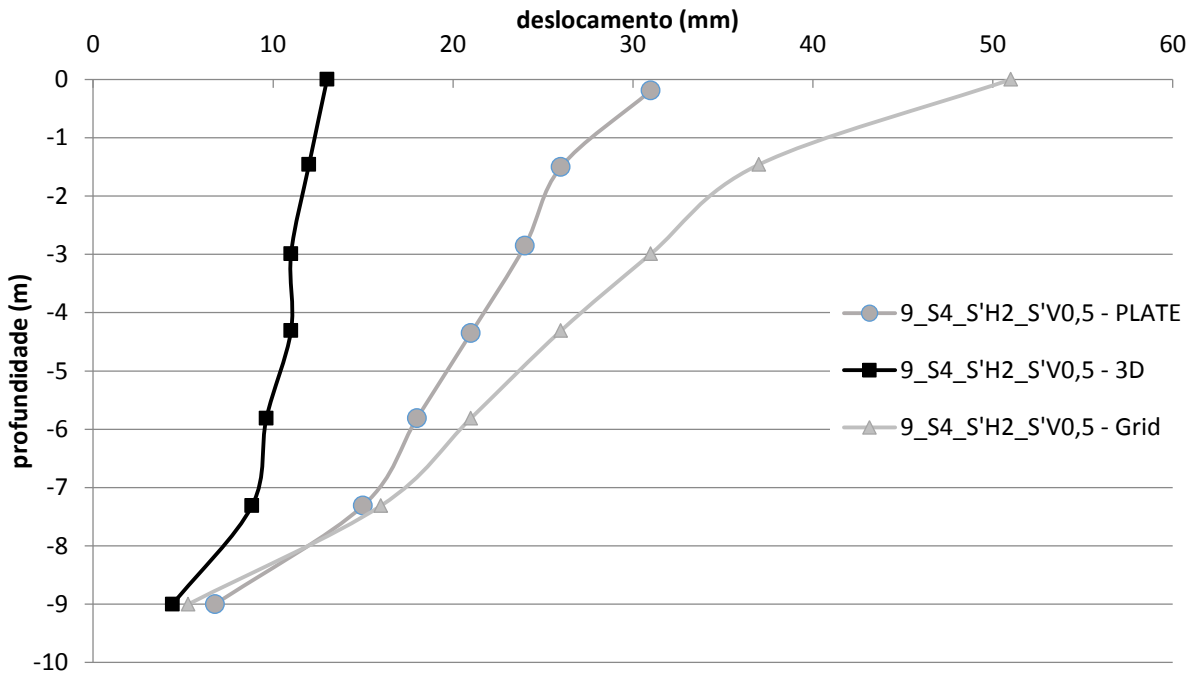
- Análise 9 - 6_S4_S'H2_S'V0,5



• Análise 10 - 9_NO_S'H2

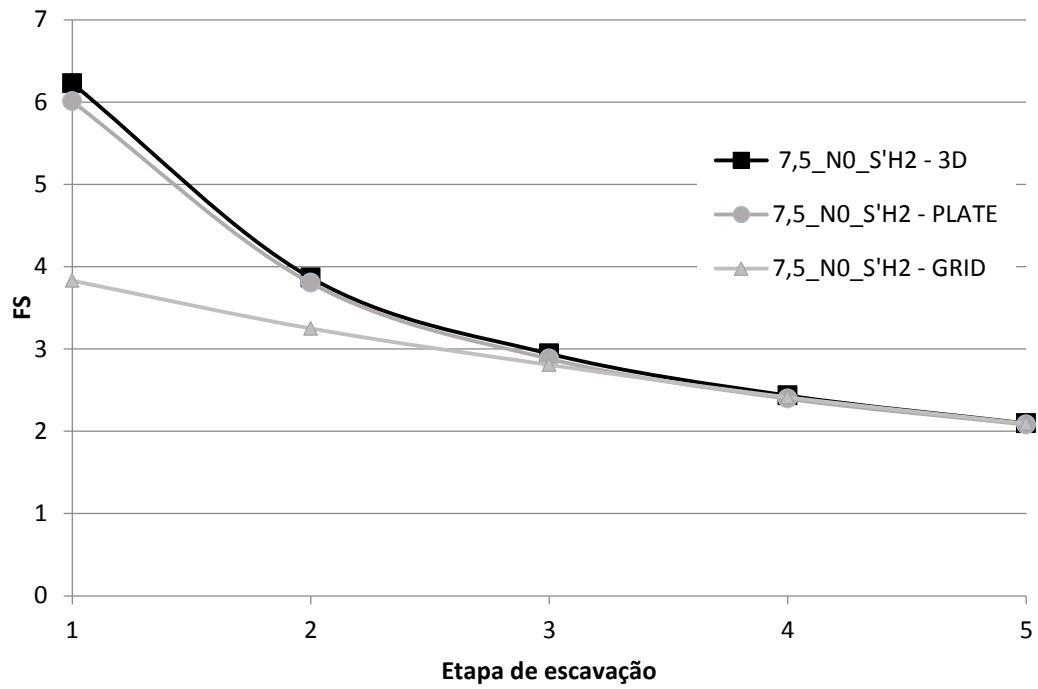


• Análise 11 - 9_S2_S'H2_S'V0,5

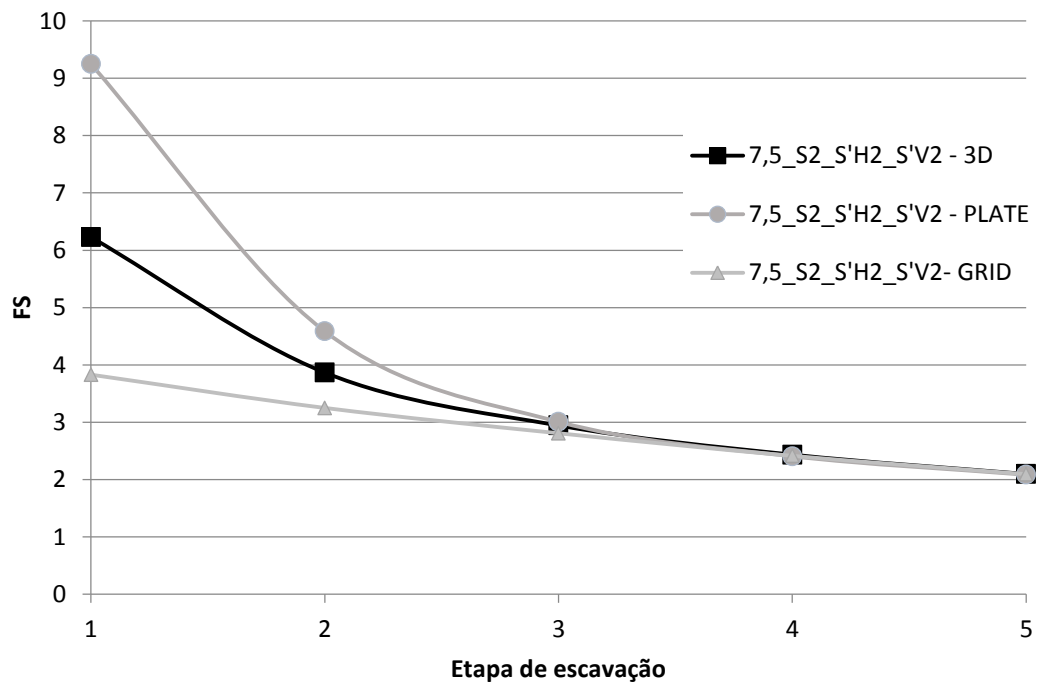


Apêndice B – Fator de segurança

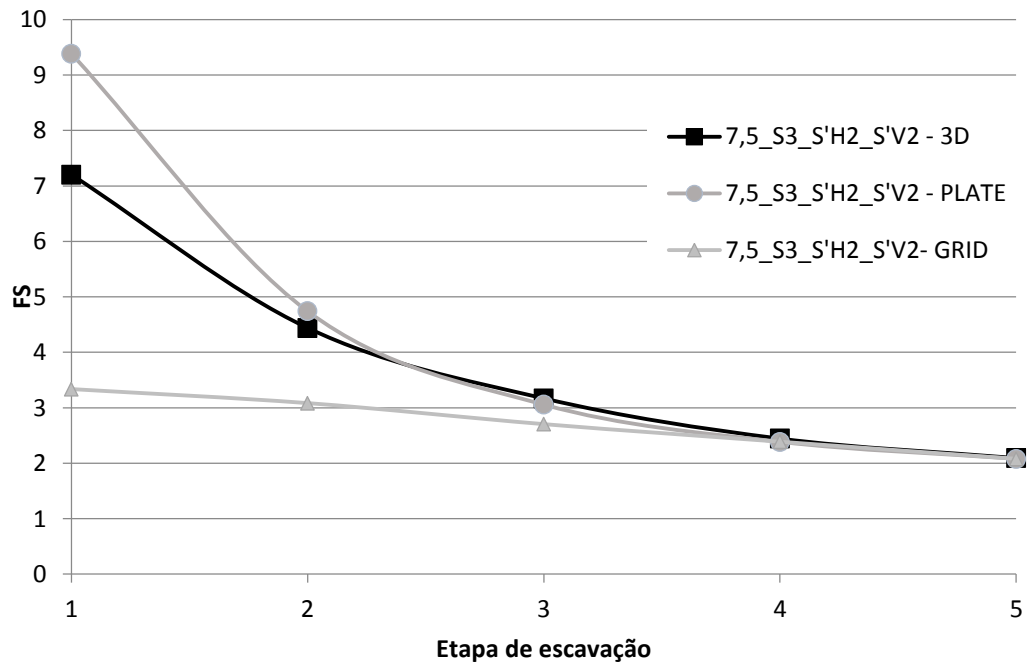
- Análise 1 – 7,5_N0_S'H2



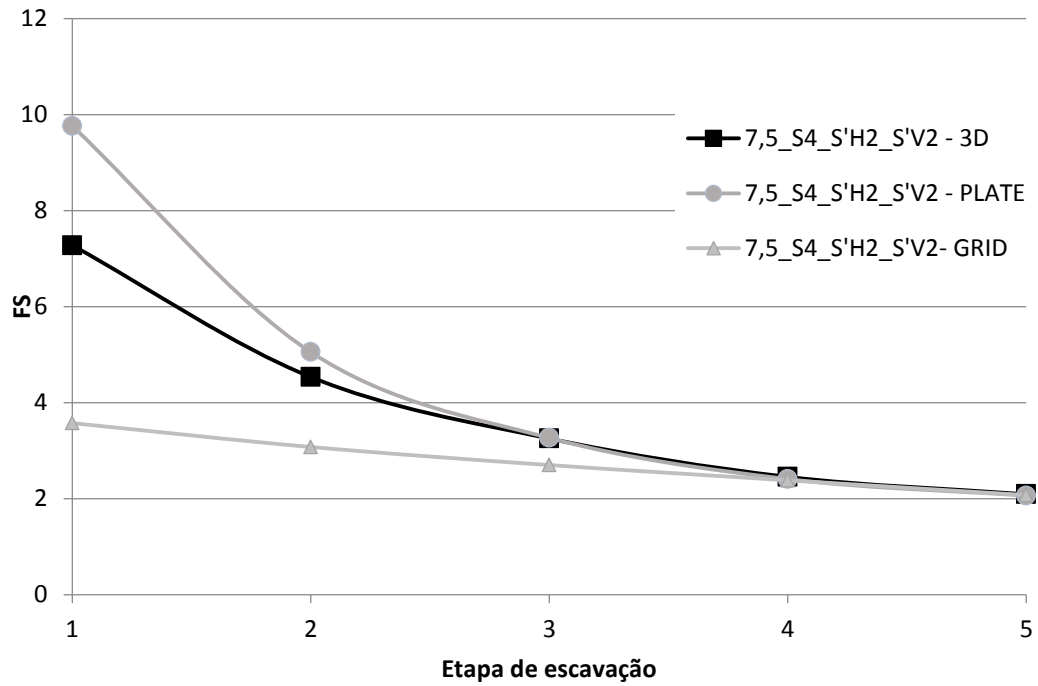
- Análise 2 – 7,5_S2_S'H2_S'V2



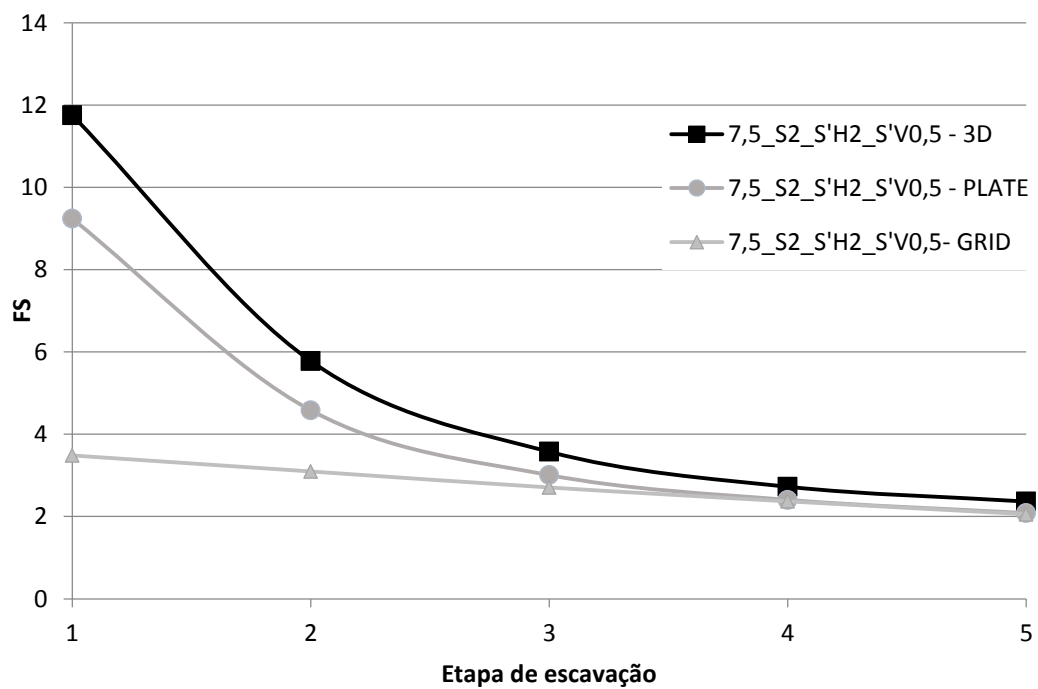
- Análise 3 - 7,5_S3_S'H2_S'V2



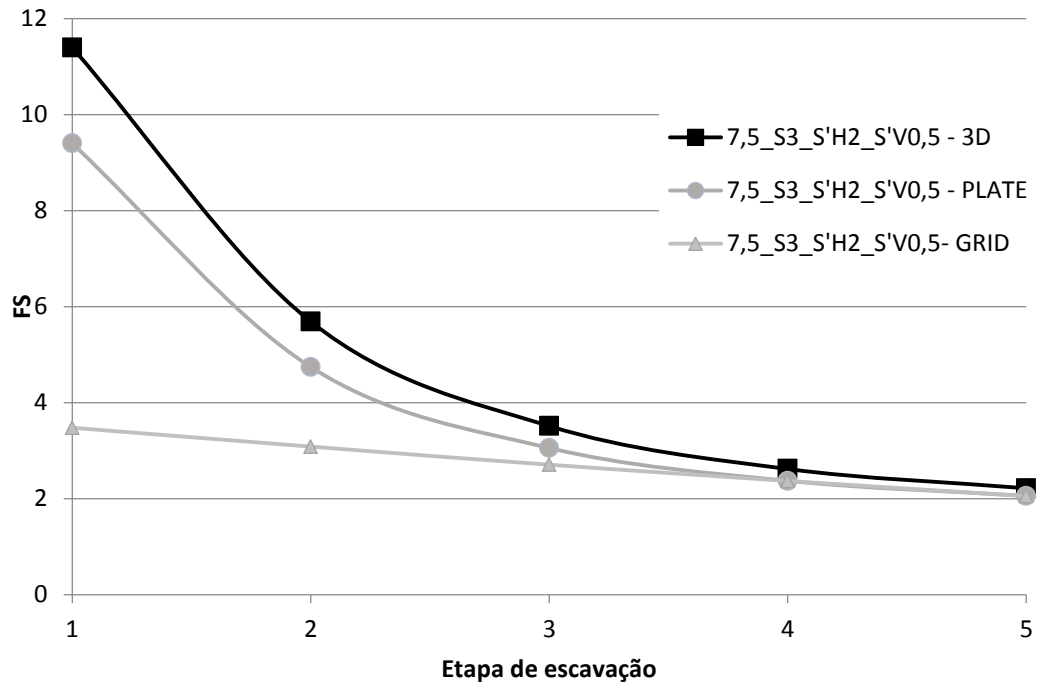
- Análise 4 - 7,5_S4_S'H2_S'V2



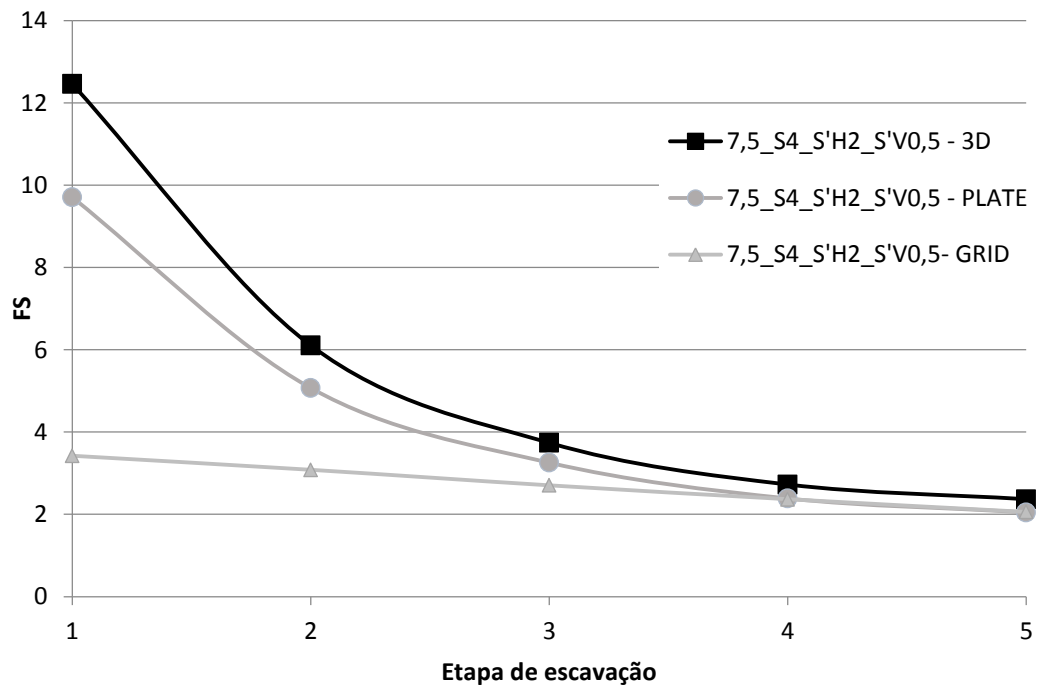
- Análise 5 - 7,5_S2_S'H2_S'V0,5



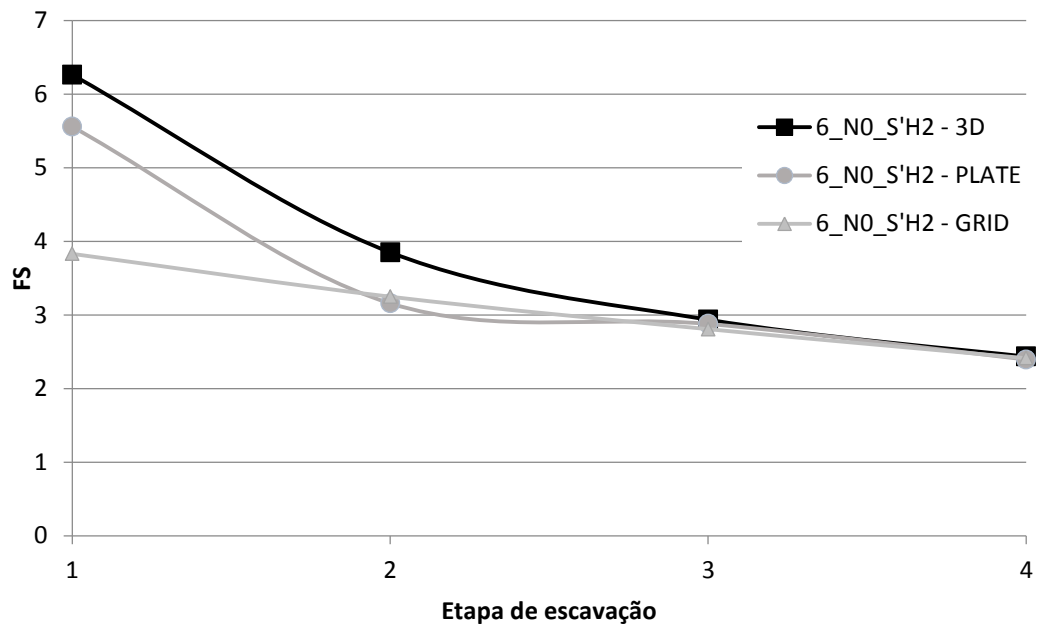
- Análise 6 - 7,5_S3_S'H2_S'V0,5



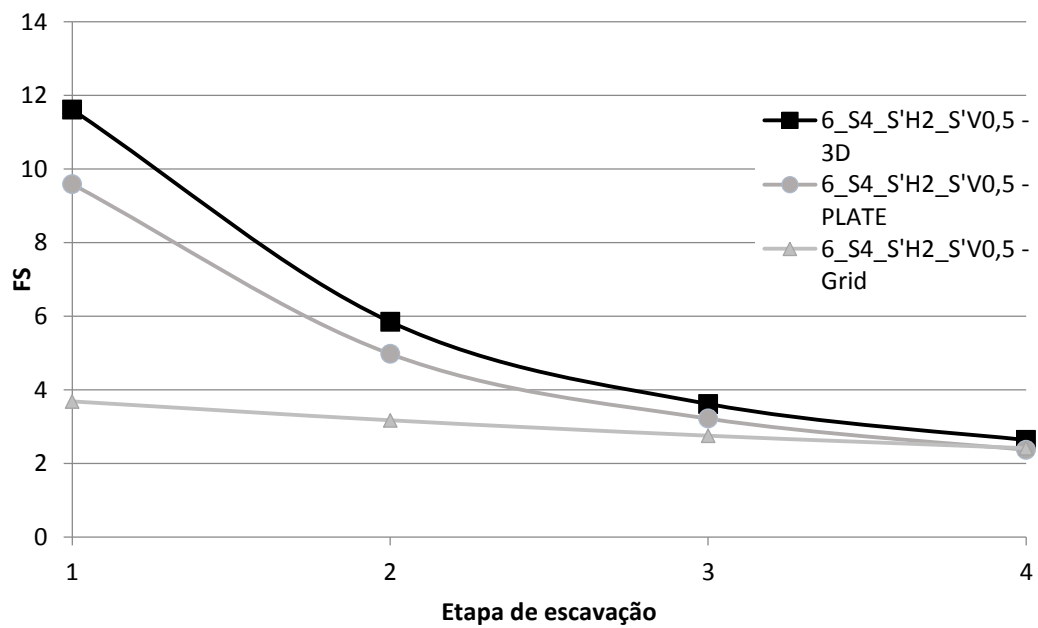
- Análise 7 - 7,5_S4_S'H2_S'V0,5



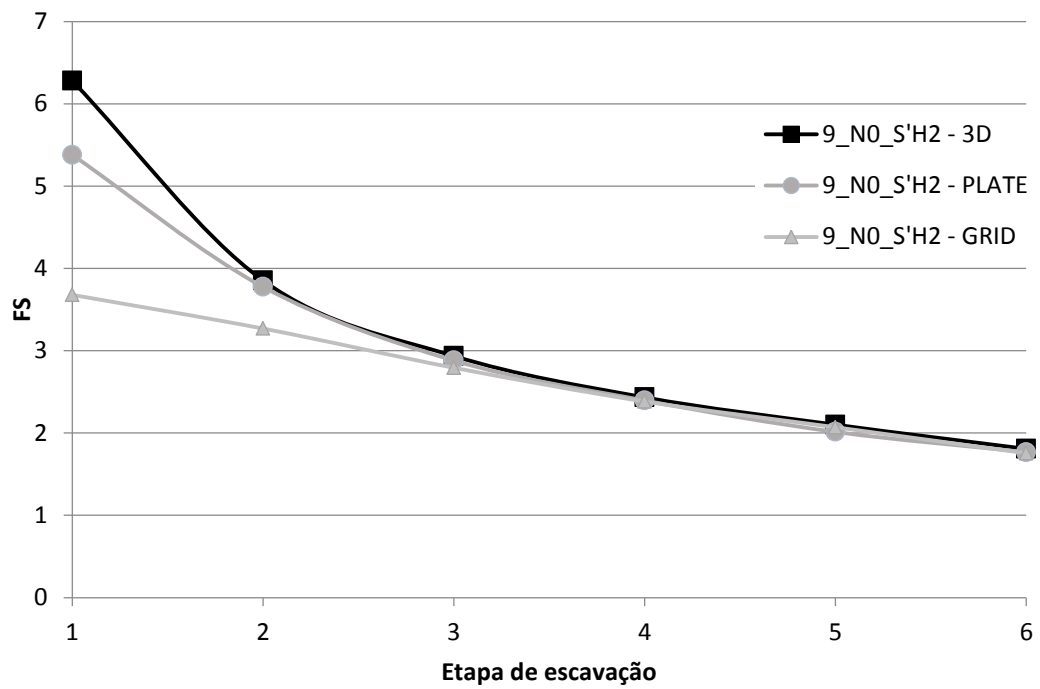
- Análise 8 - 6_NO_S'H2



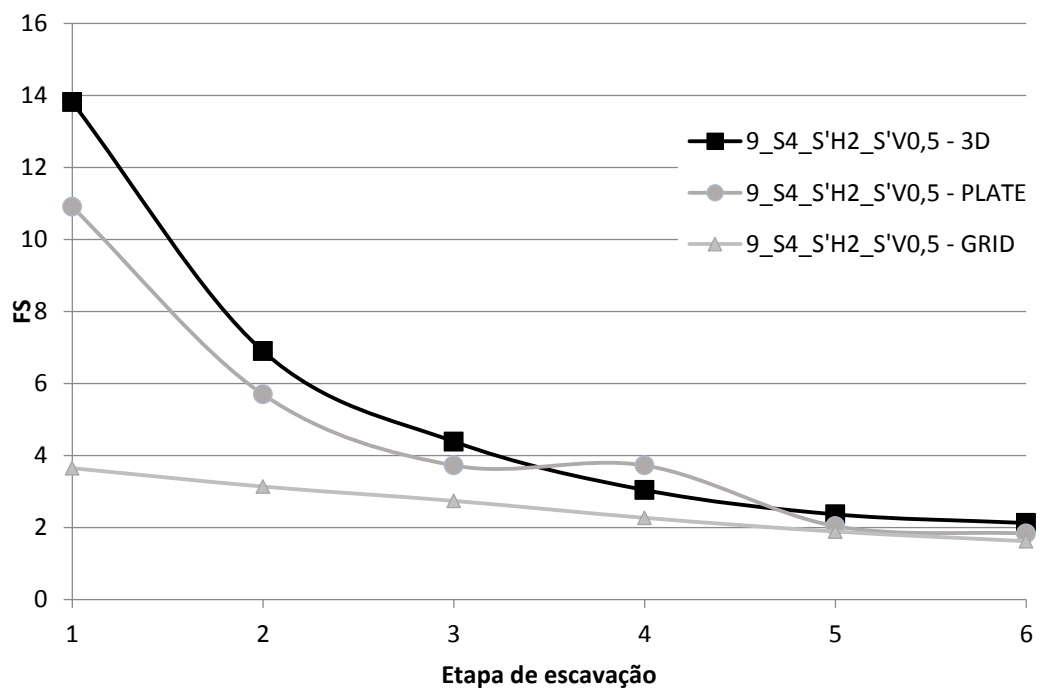
- Análise 9 - 6_S4_S'H2_S'V0,5



- Análise 10 - 9_NO_S'H2

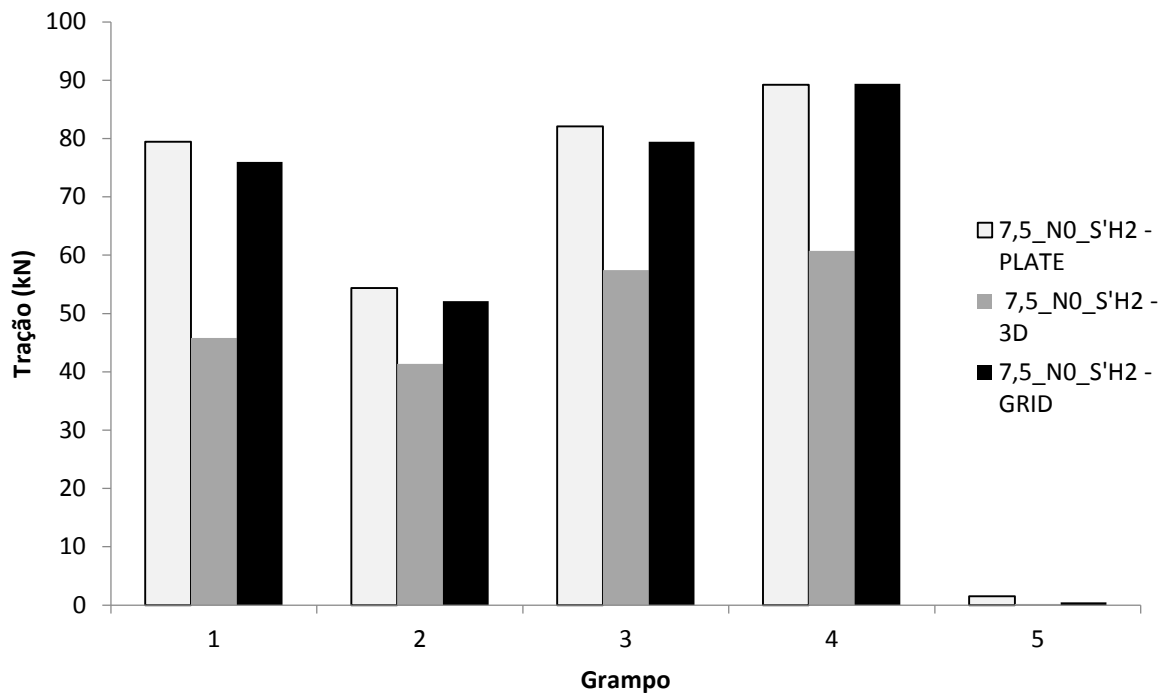


- Análise 11 - 9_S2_S'H2_S'V0,5

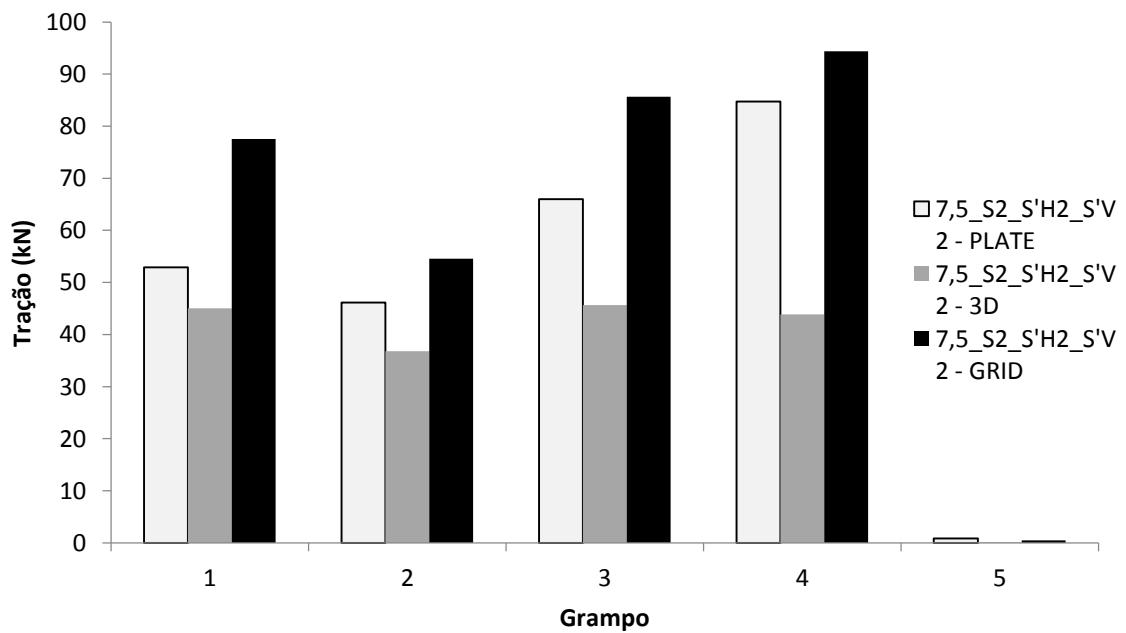


Apêndice C – Tração nos grampos

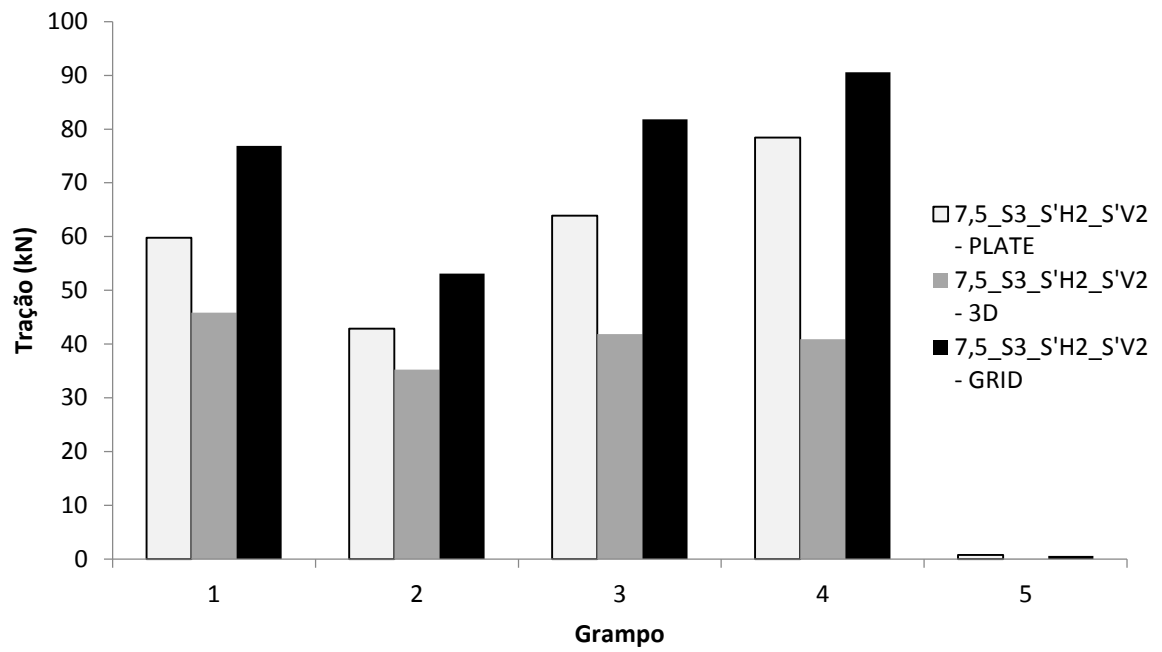
- Análise 1 – 7,5_N0_S'H2



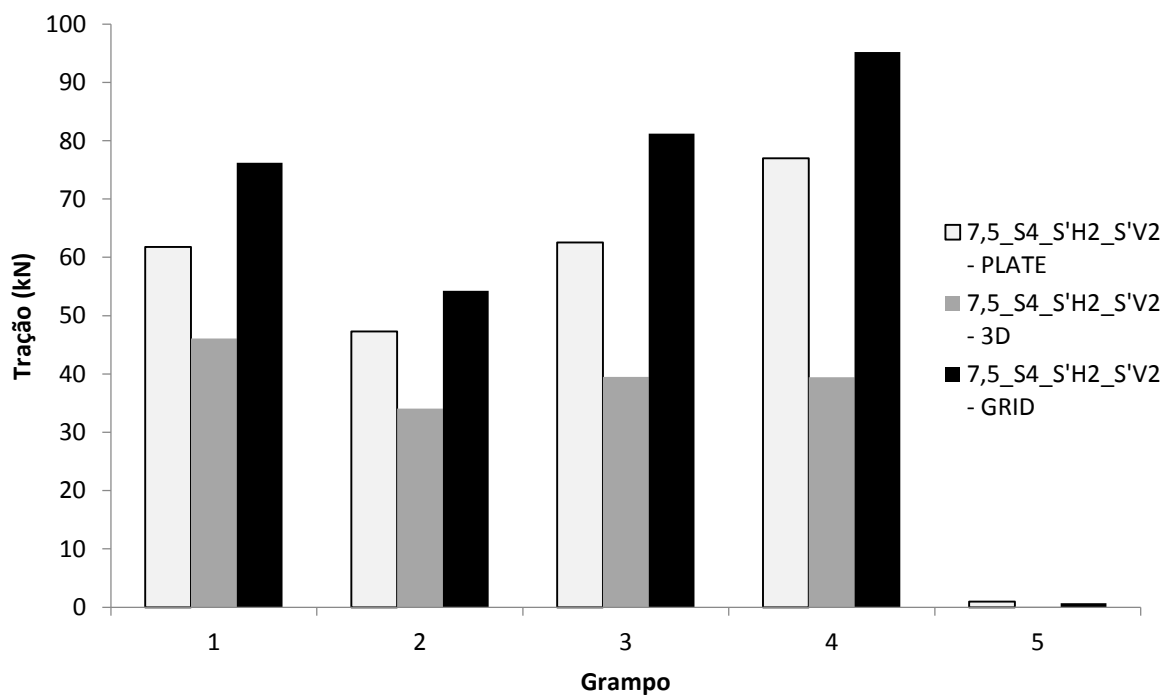
- Análise 2 – 7,5_S2_S'H2_S'V2



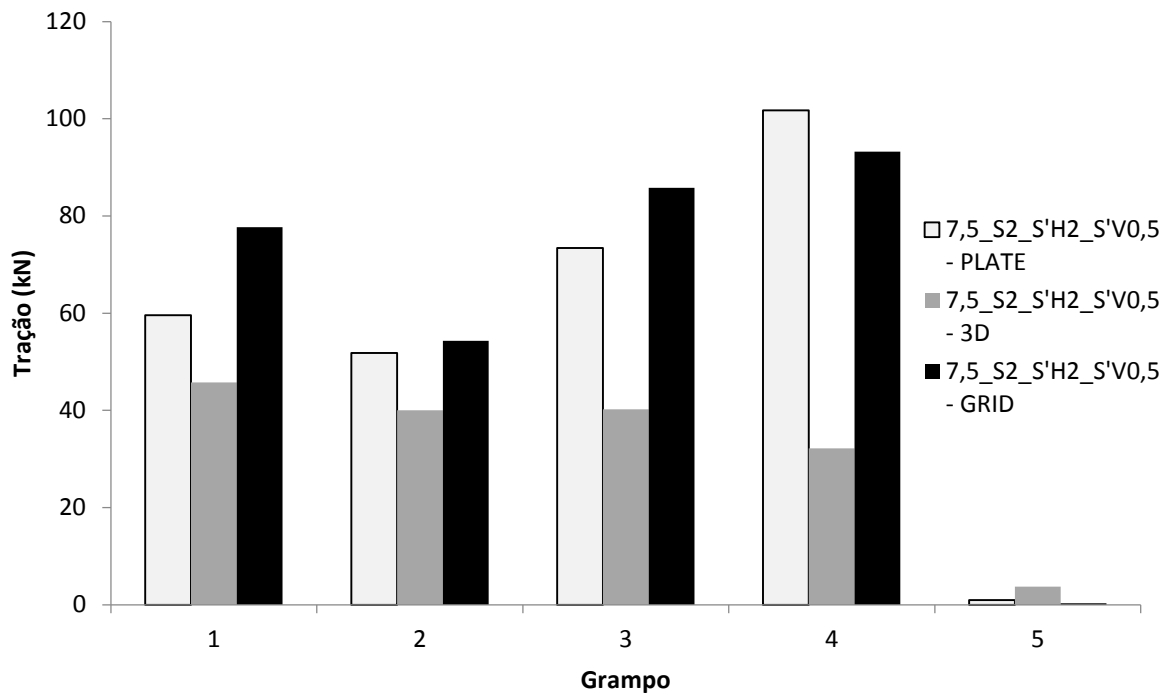
- Análise 3 - 7,5_S3_S'H2_S'V2



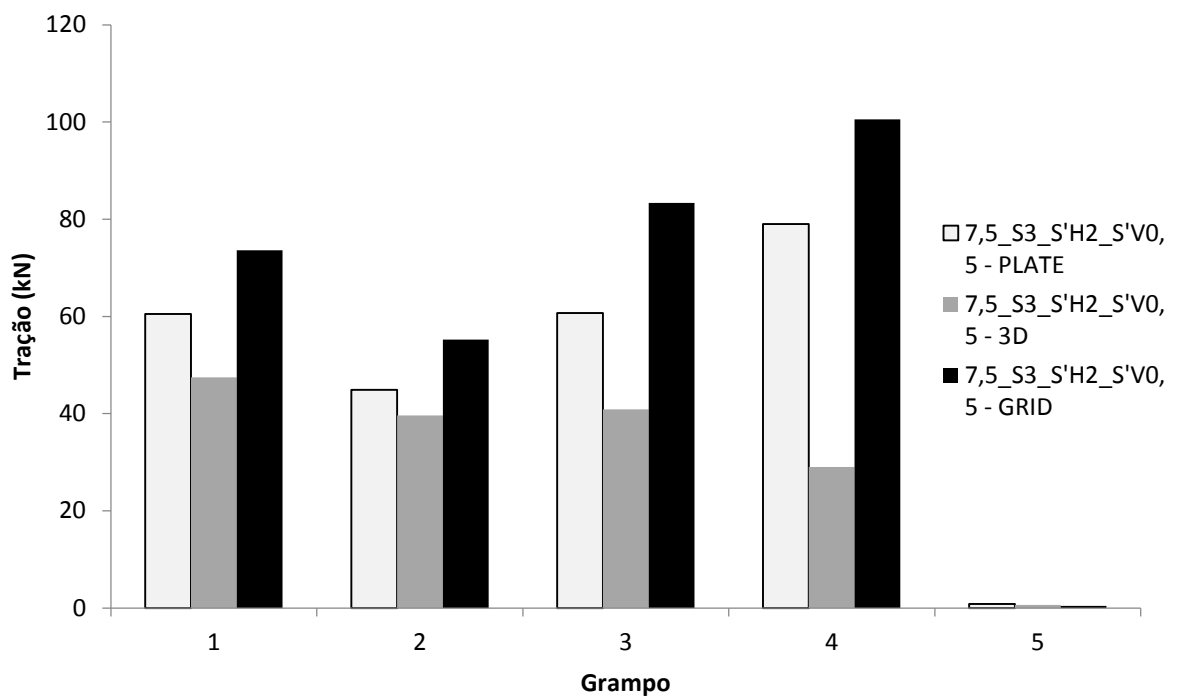
- Análise 4 - 7,5_S4_S'H2_S'V2



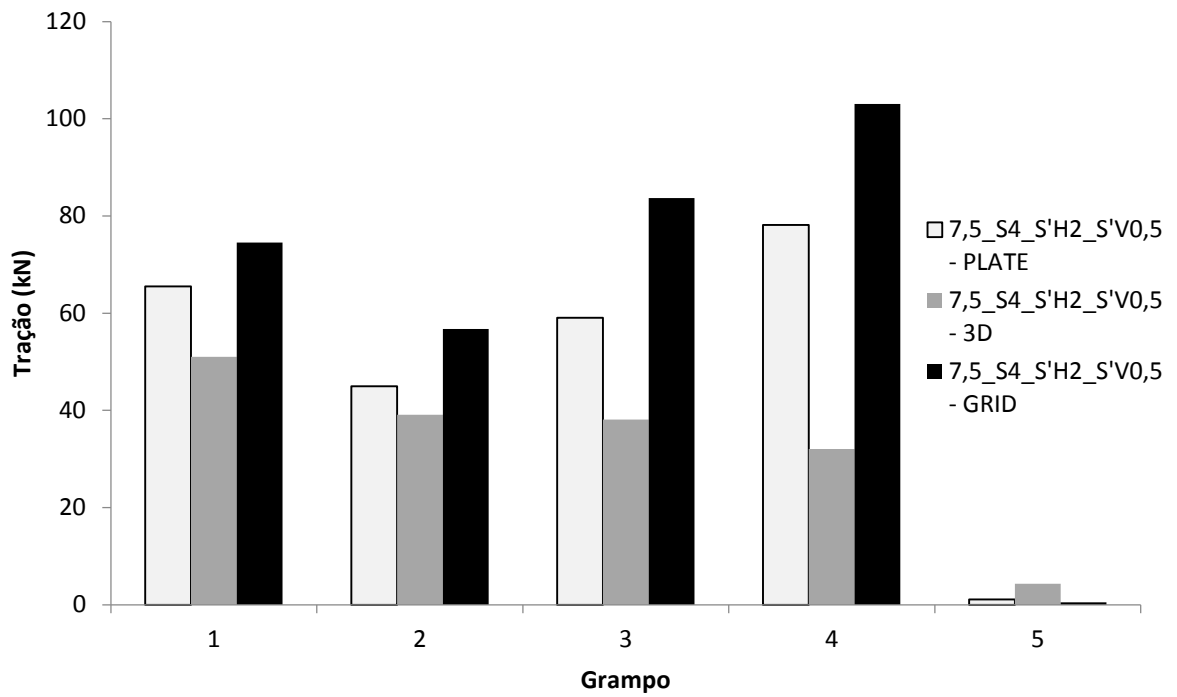
- Análise 5 - 7,5_S2_S'H2_S'V0,5



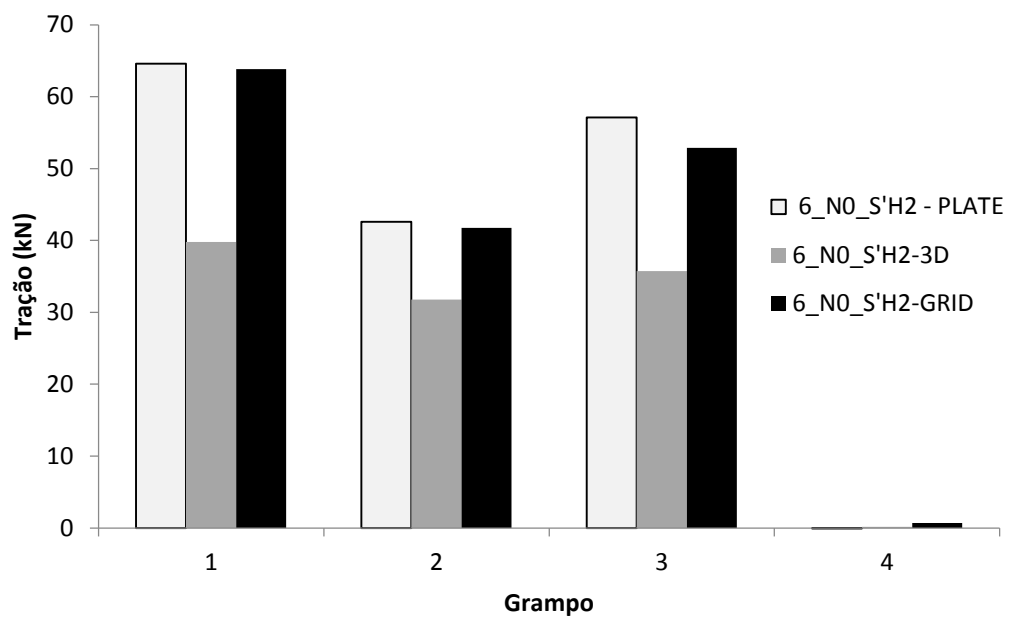
- Análise 6 - 7,5_S3_S'H2_S'V0,5



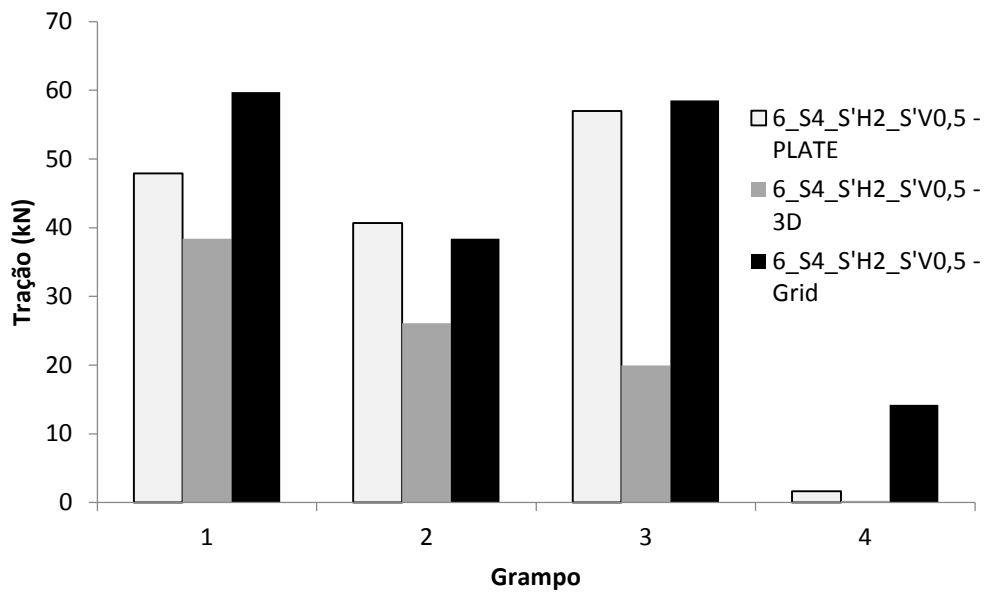
- Análise 7 - 7,5_S4_S'H2_S'V0,5



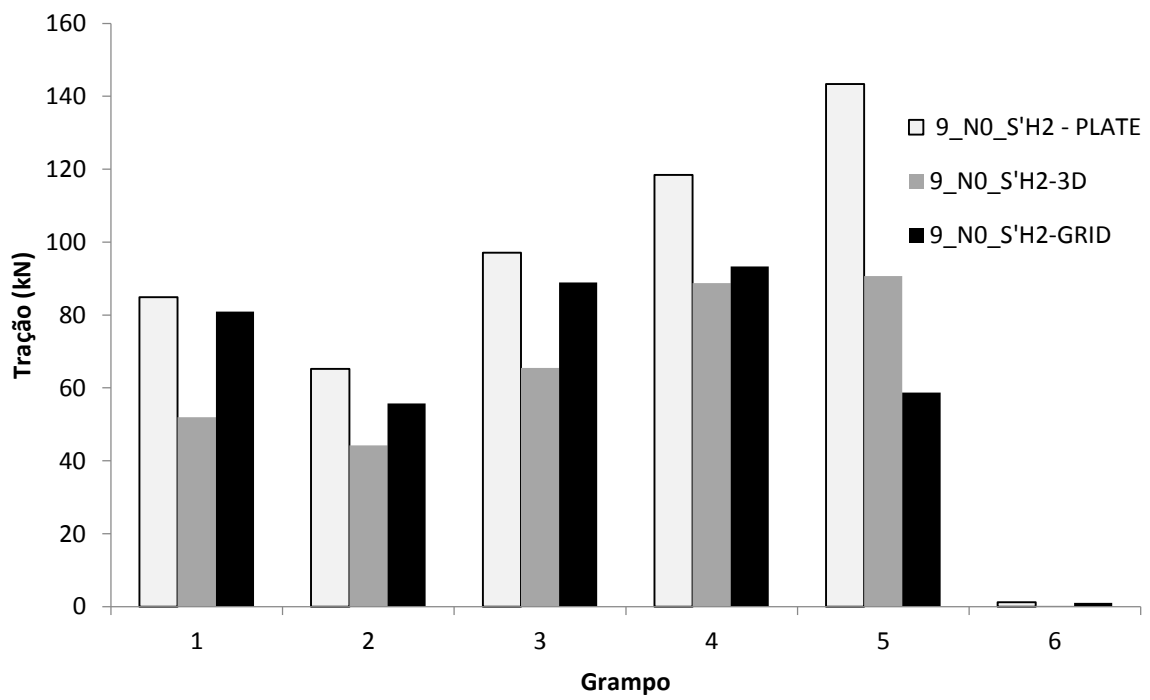
- Análise 8 - 6_NO_S'H2



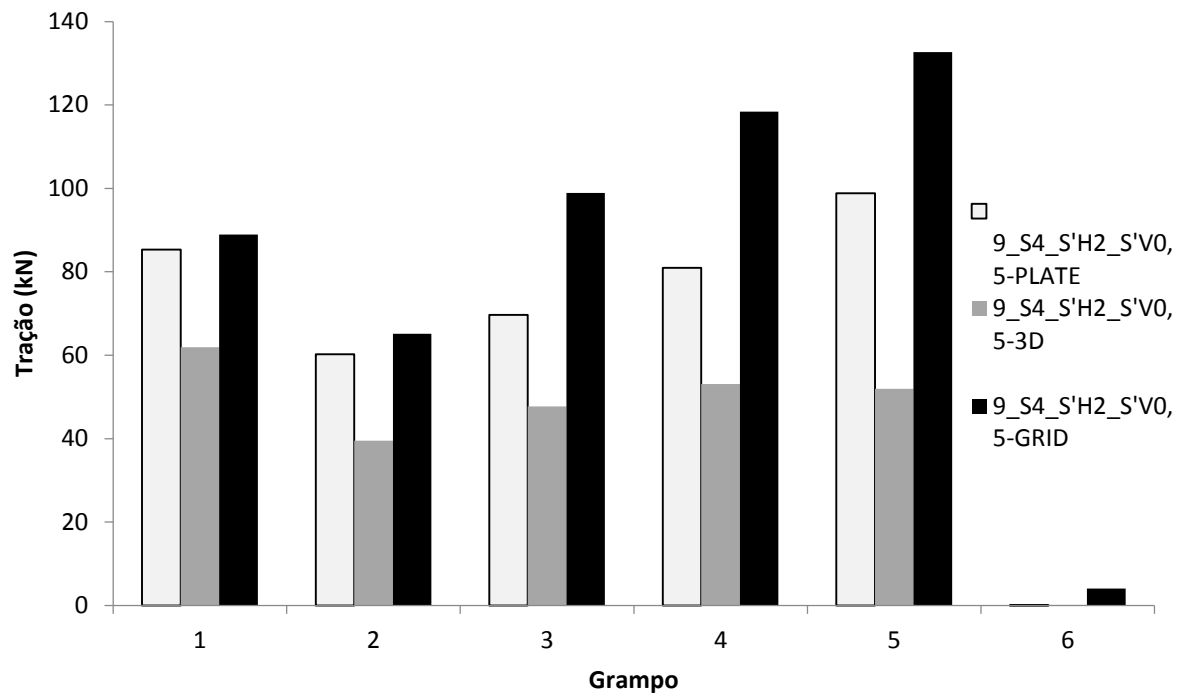
- Análise 9 - 6_S4_S'H2_S'V0,5



- Análise 10 - 9_N0_S'H2

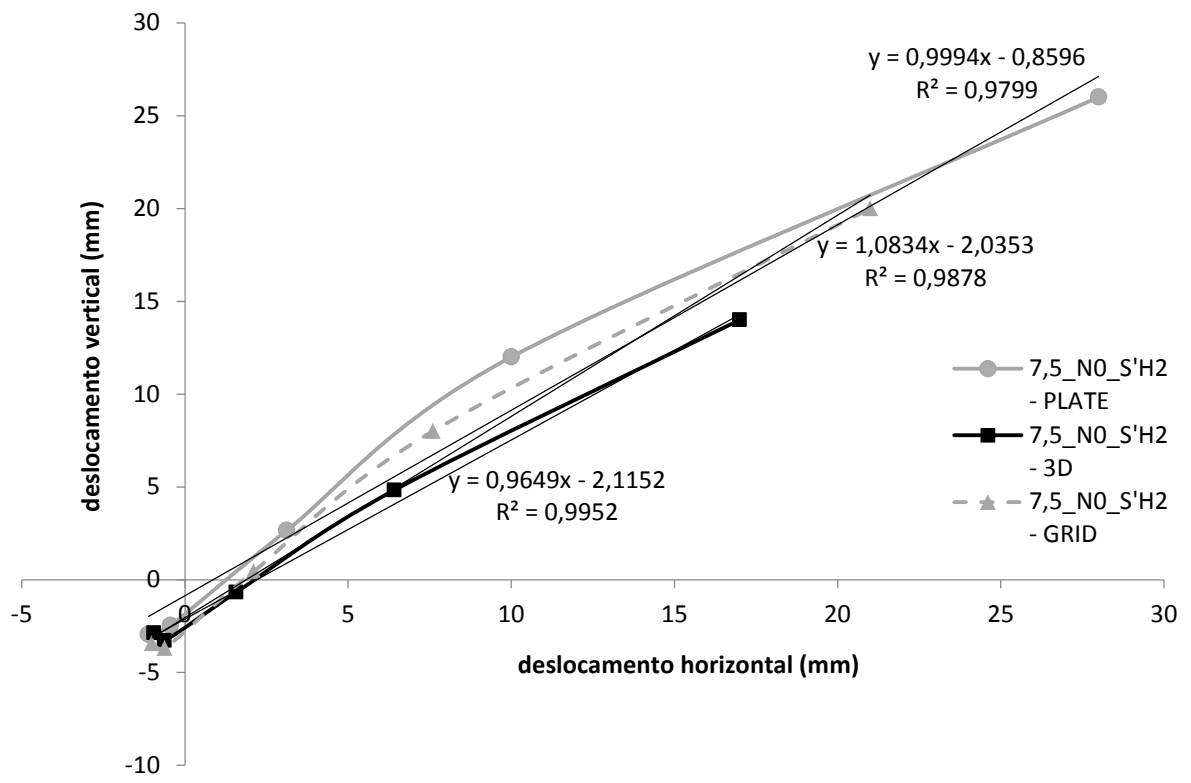


- Análise 11 - 9_S2_S'H2_S'V0,5

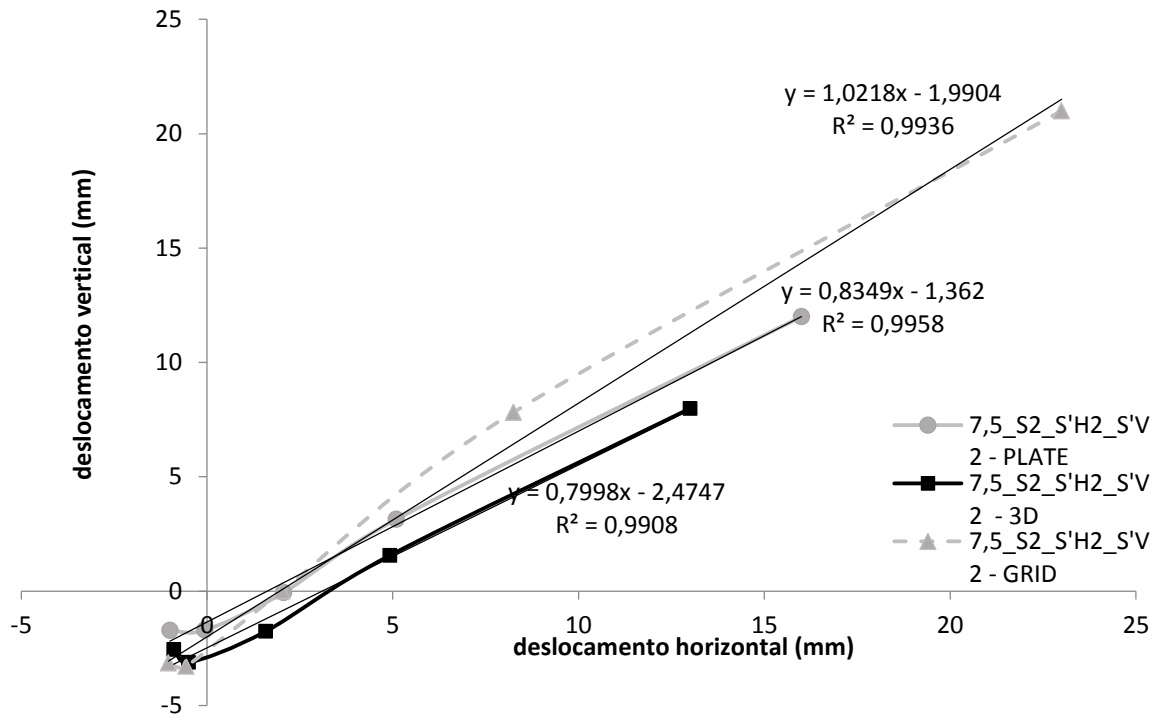


**Apêndice D – Deslocamento horizontal *versus*
deslocamento vertical**

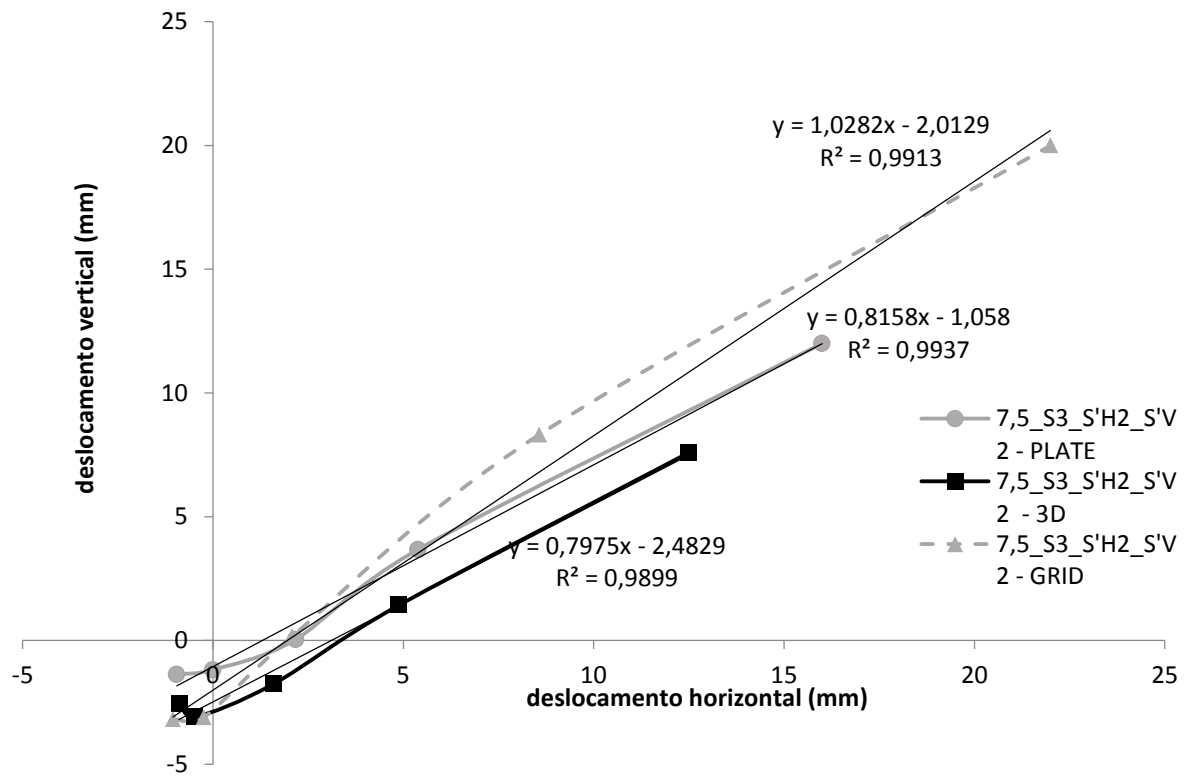
- Análise 1 – 7,5_N0_S'H2



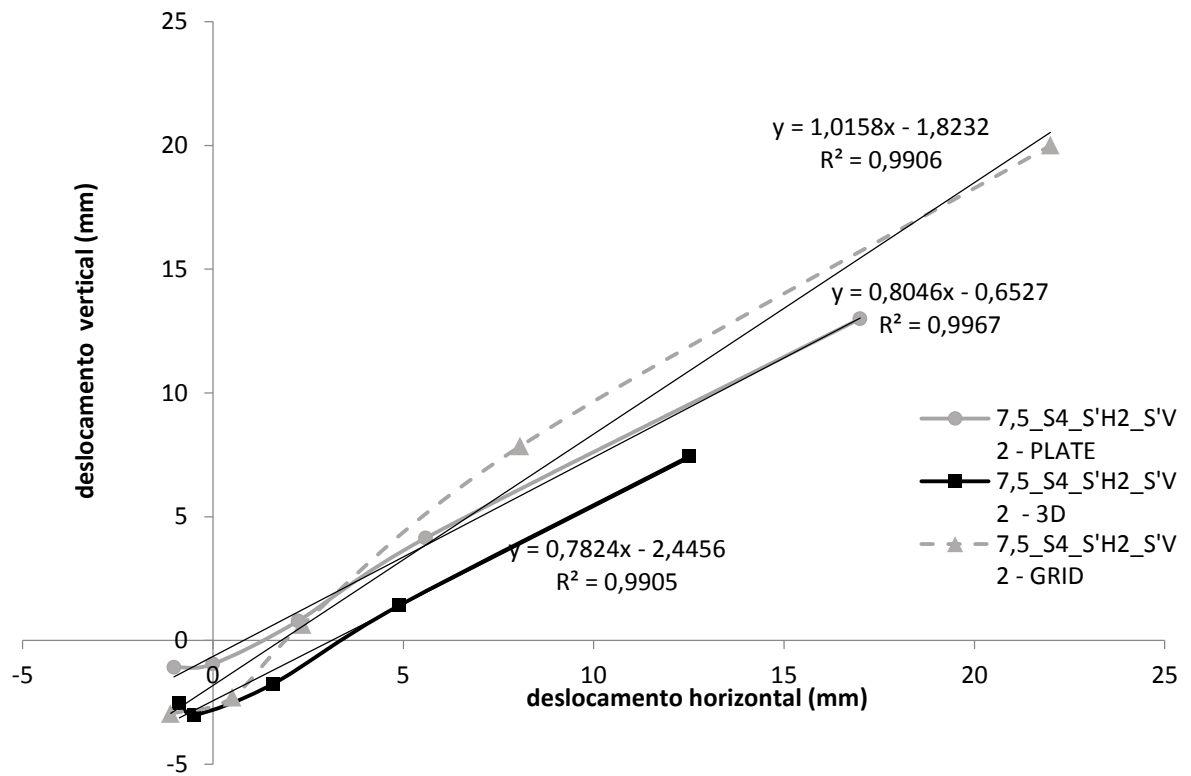
- Análise 2 – 7,5_S2_S'H2_S'V2



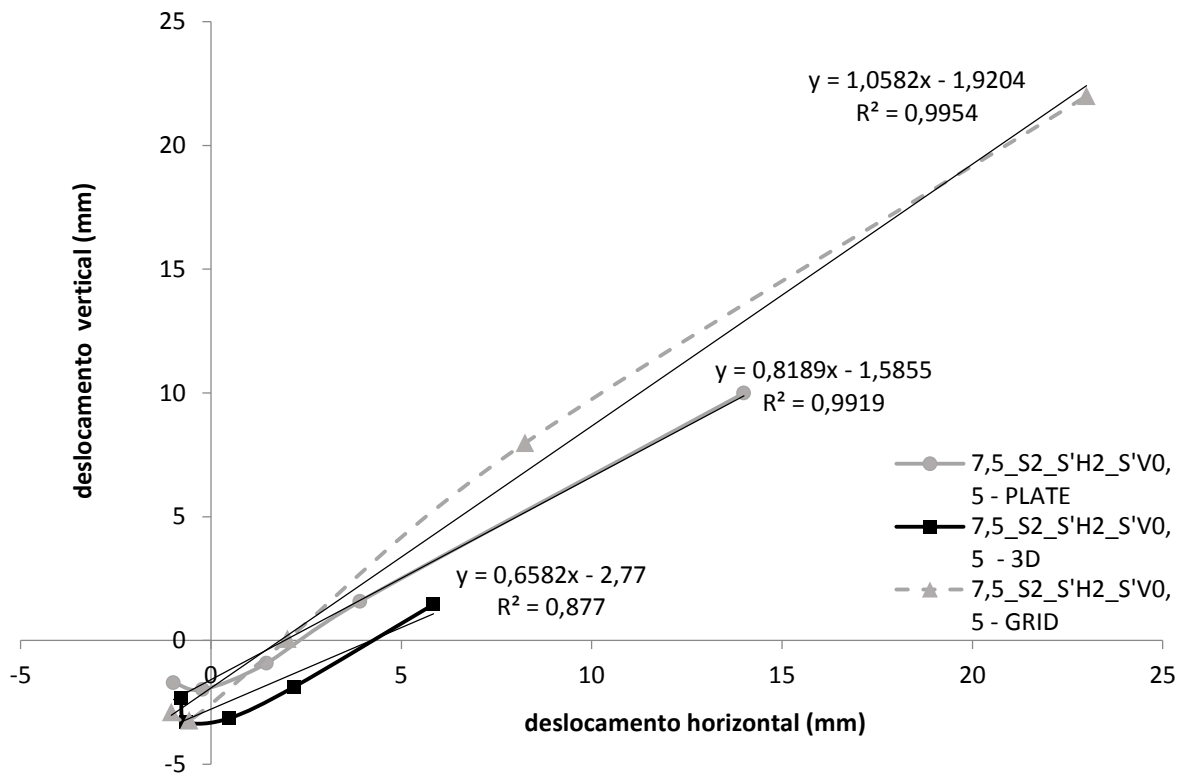
- Análise 3 - 7,5_S3_S'H2_S'V2



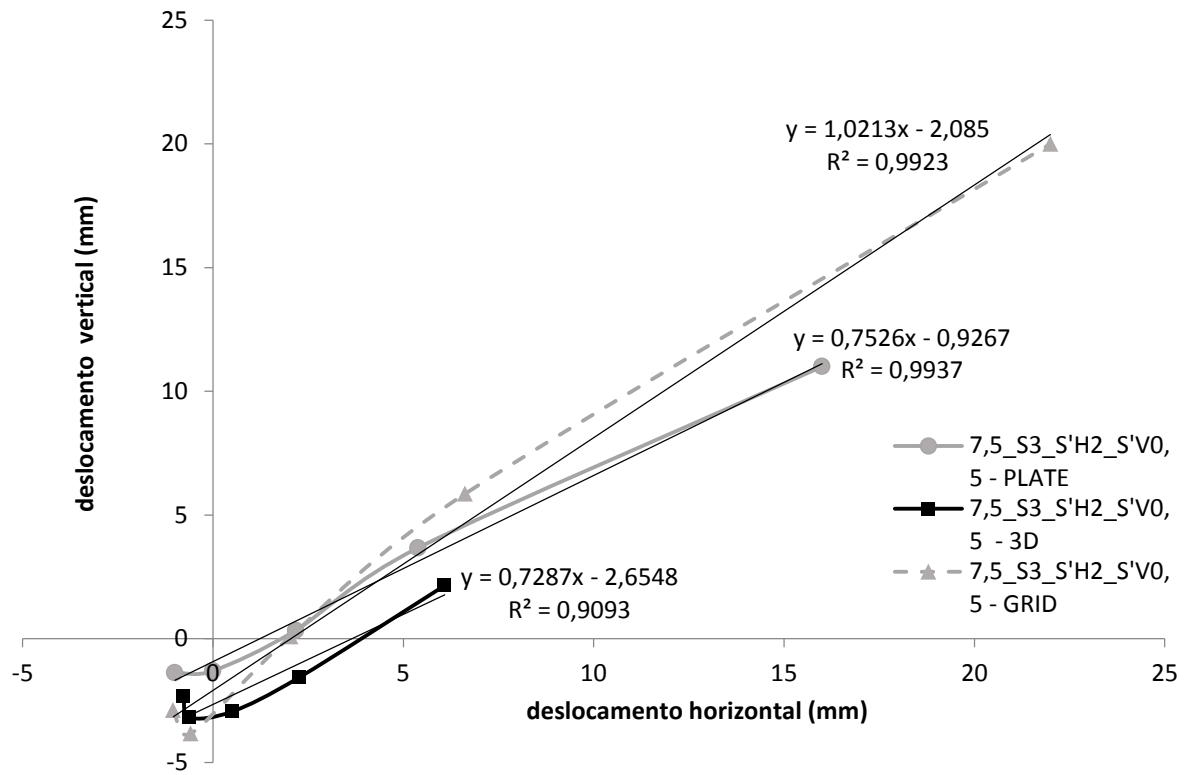
- Análise 4 - 7,5_S4_S'H2_S'V2



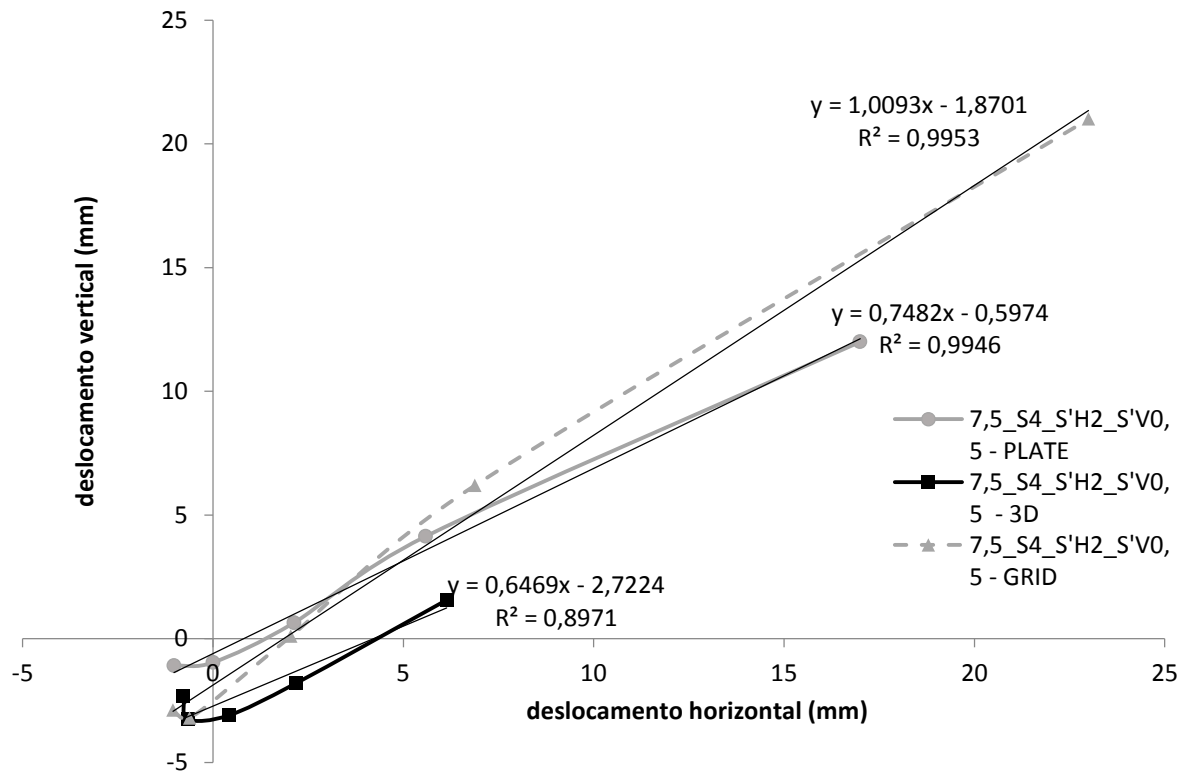
- Análise 5 - 7,5_S2_S'H2_S'V0,5



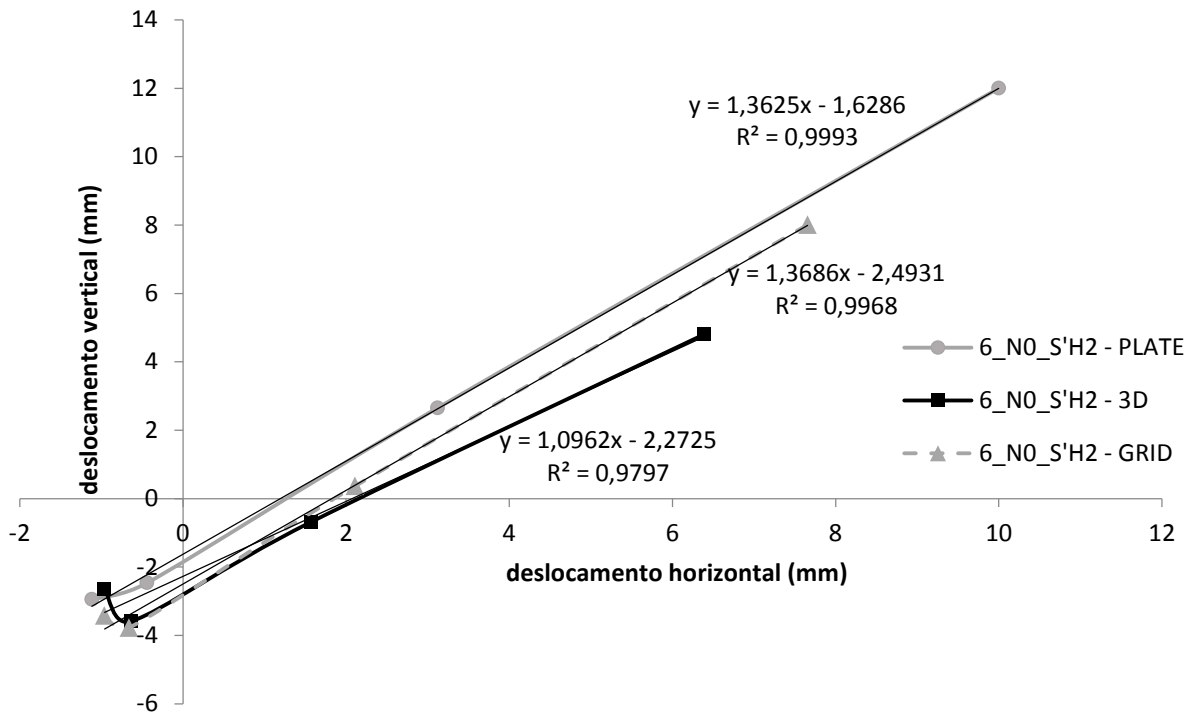
- Análise 6 - 7,5_S3_S'H2_S'V0,5



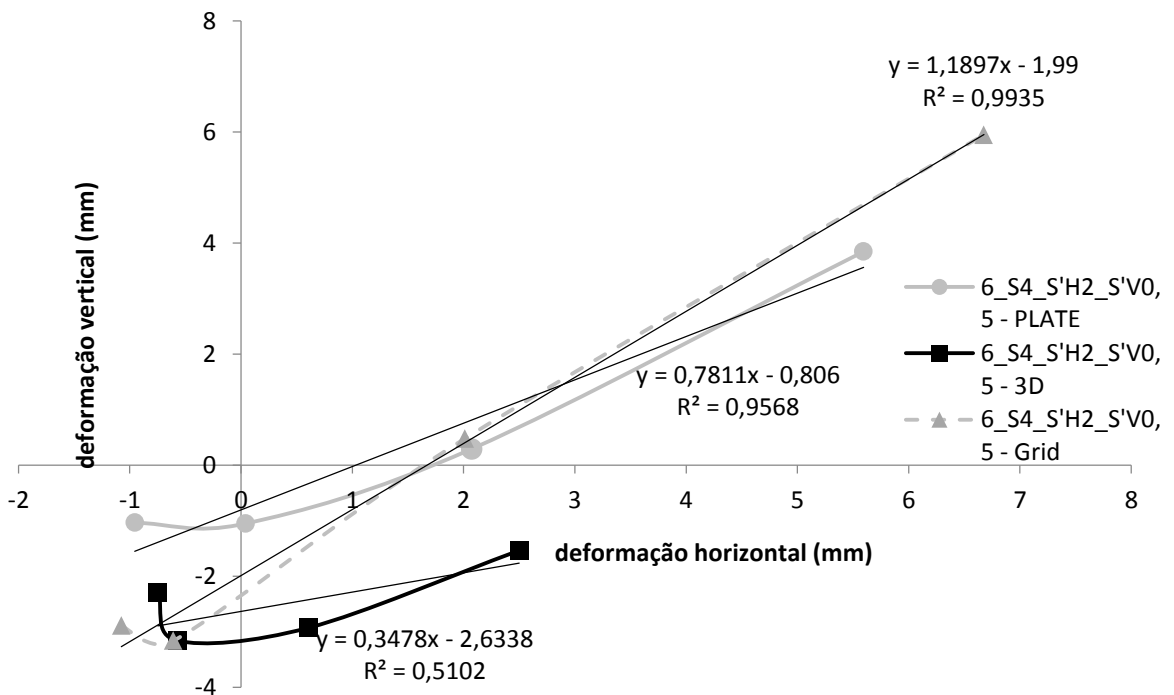
- Análise 7 - 7,5_S4_S'H2_S'V0,5



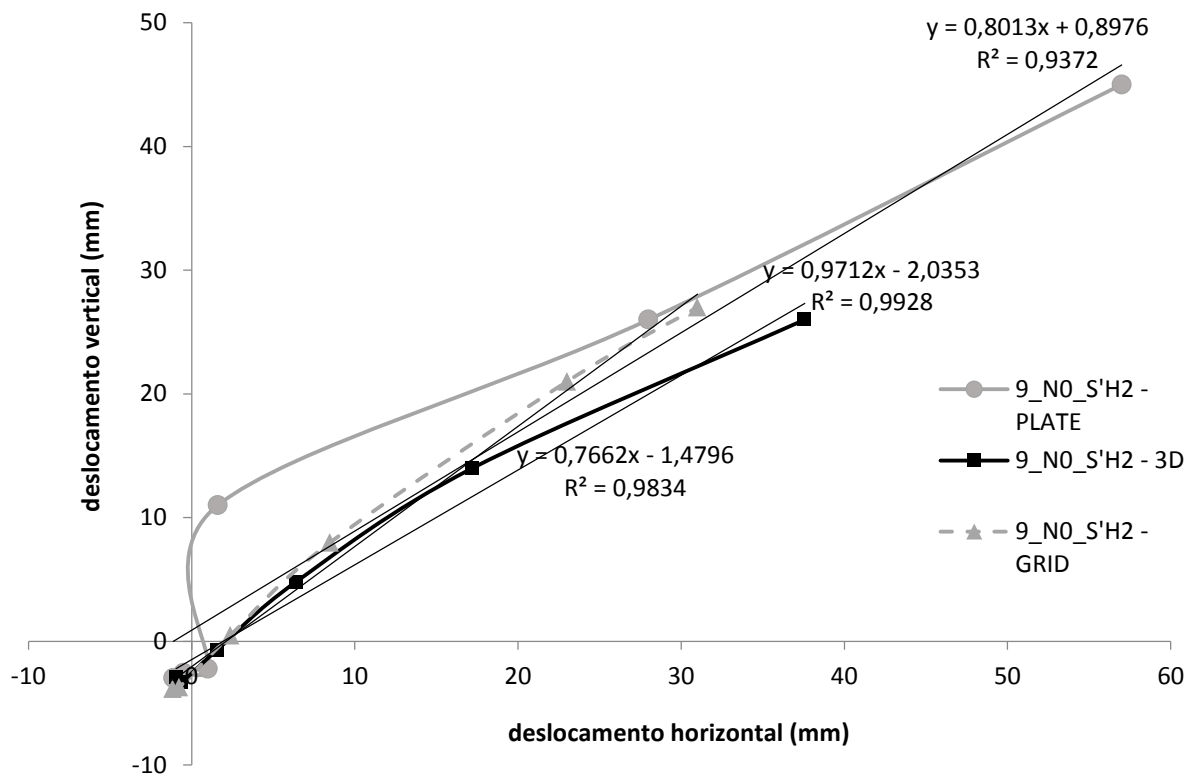
- Análise 8 - 6_NO_S'H2



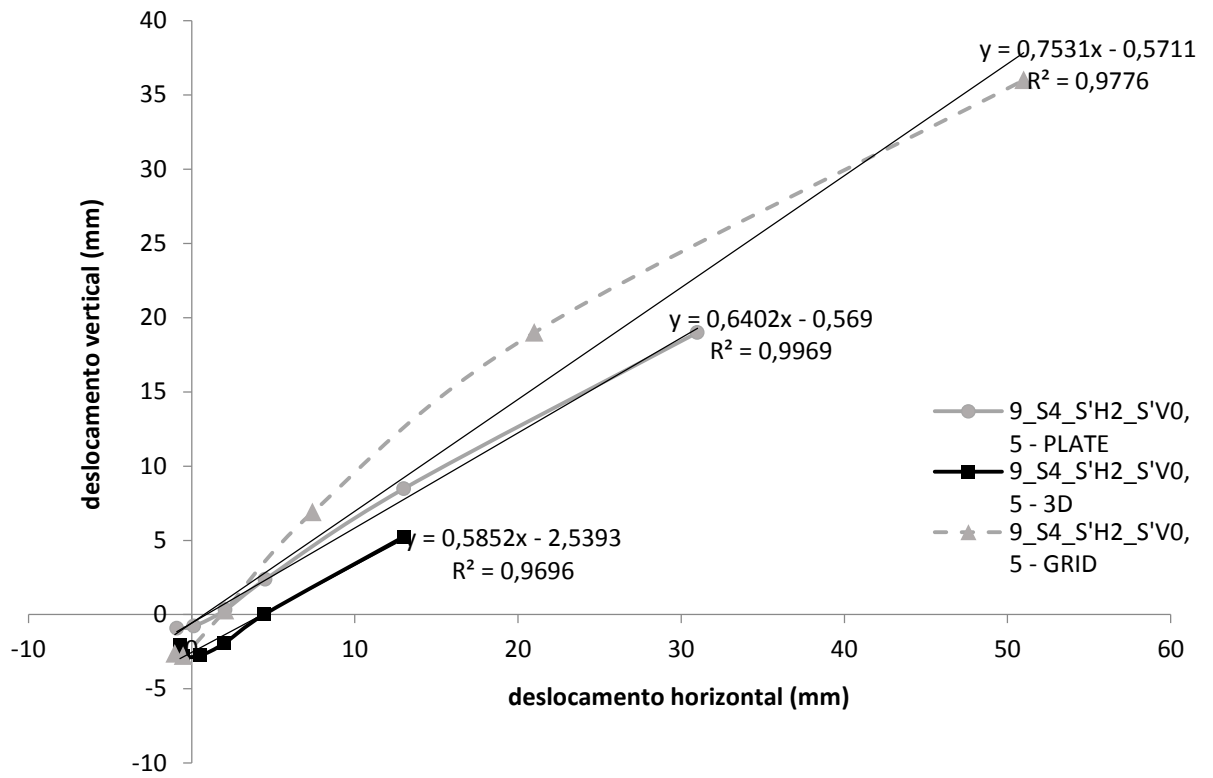
- Análise 9 - 6_S4_S'H2_S'V0,5



- Análise 10 - 9_NO_S'H2

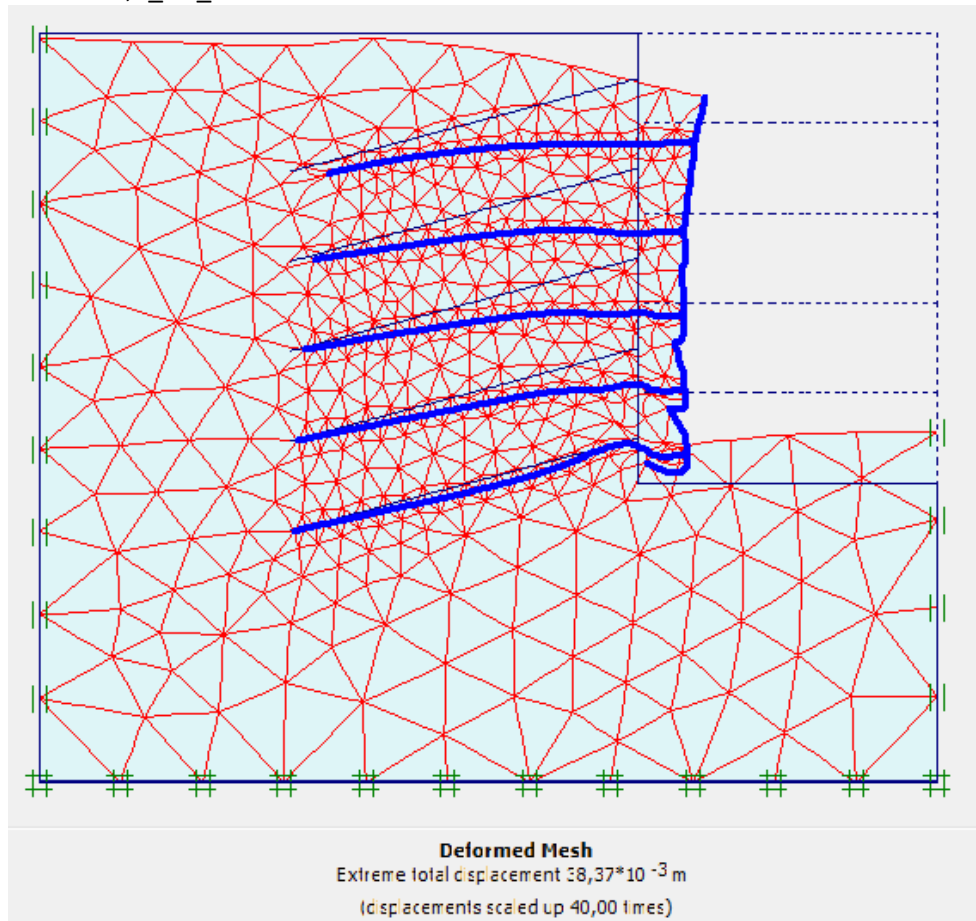


- Análise 11 - 9_S2_S'H2_S'V0,5

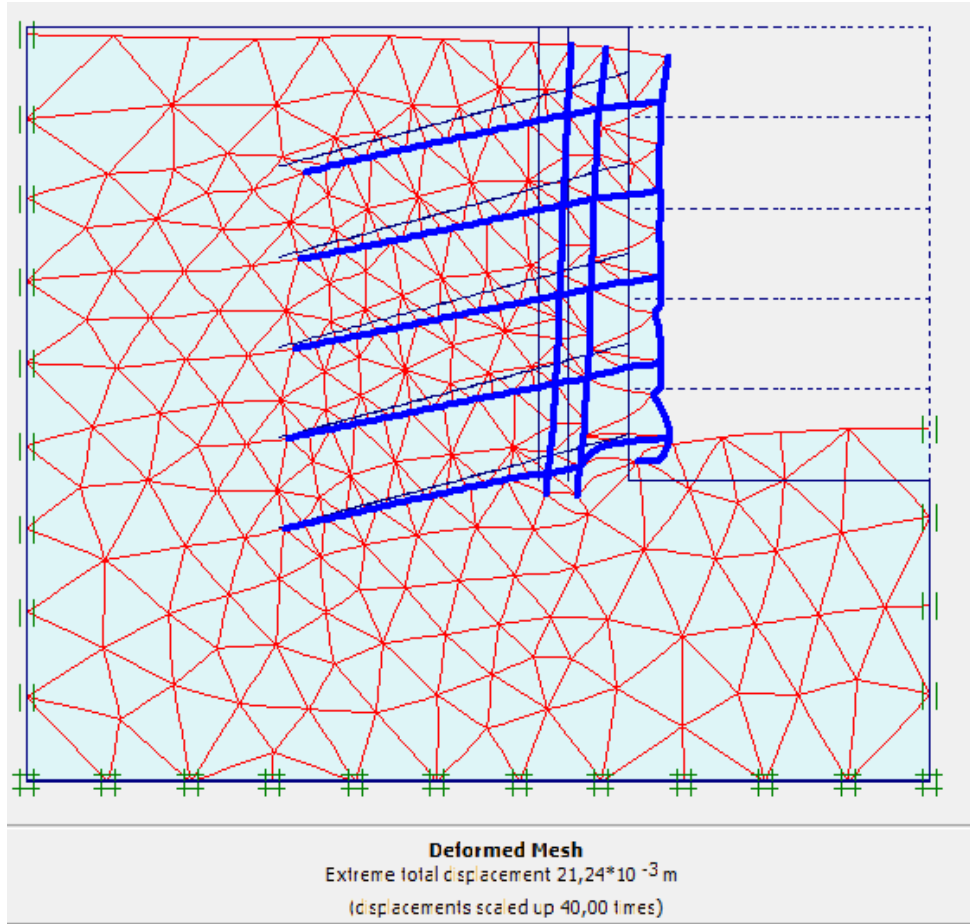


**Apêndice E – Estrutura deformada aumentada em 40
vezes – plaxis 2D**

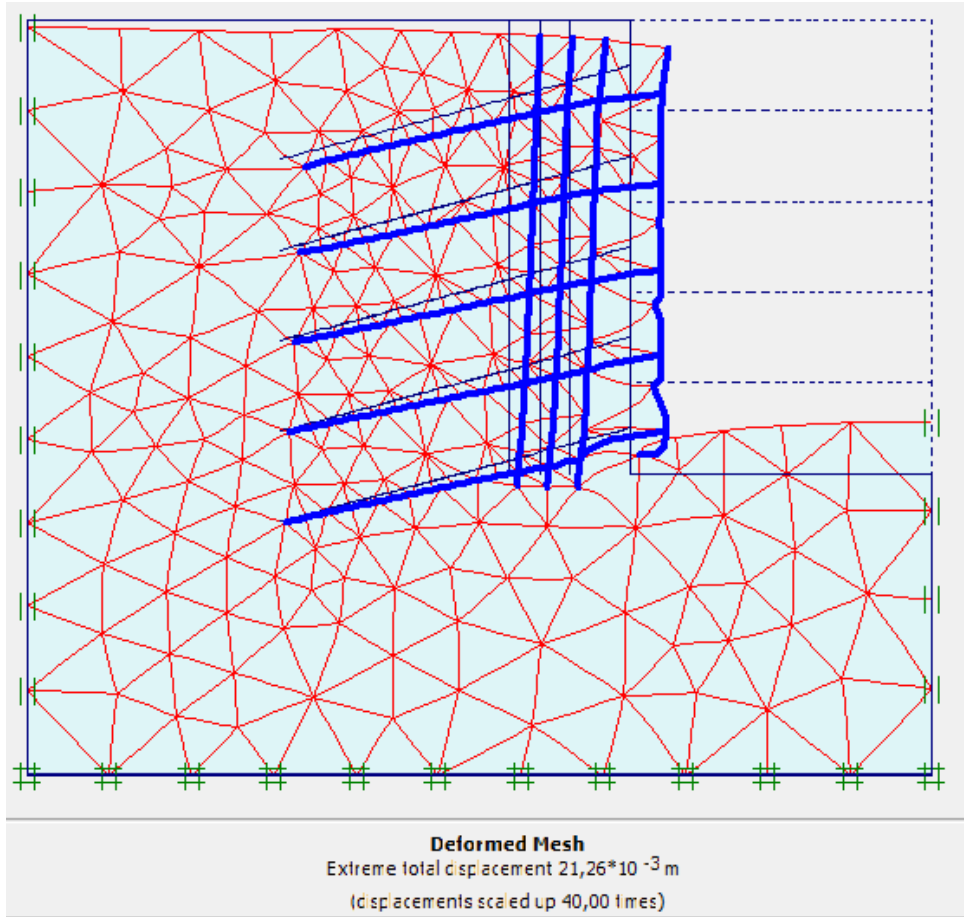
- Análise 1: 7,5_NO_S'H2



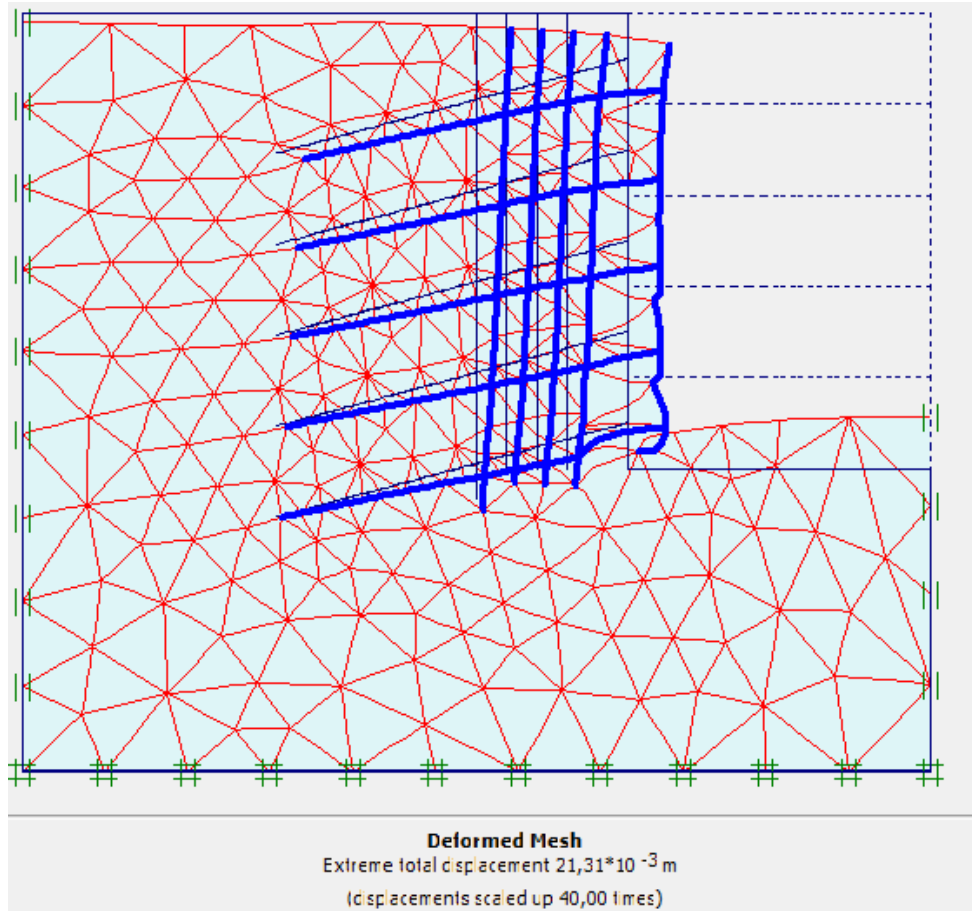
- Análise 2: 7,5_S2_S'H2_S'V2



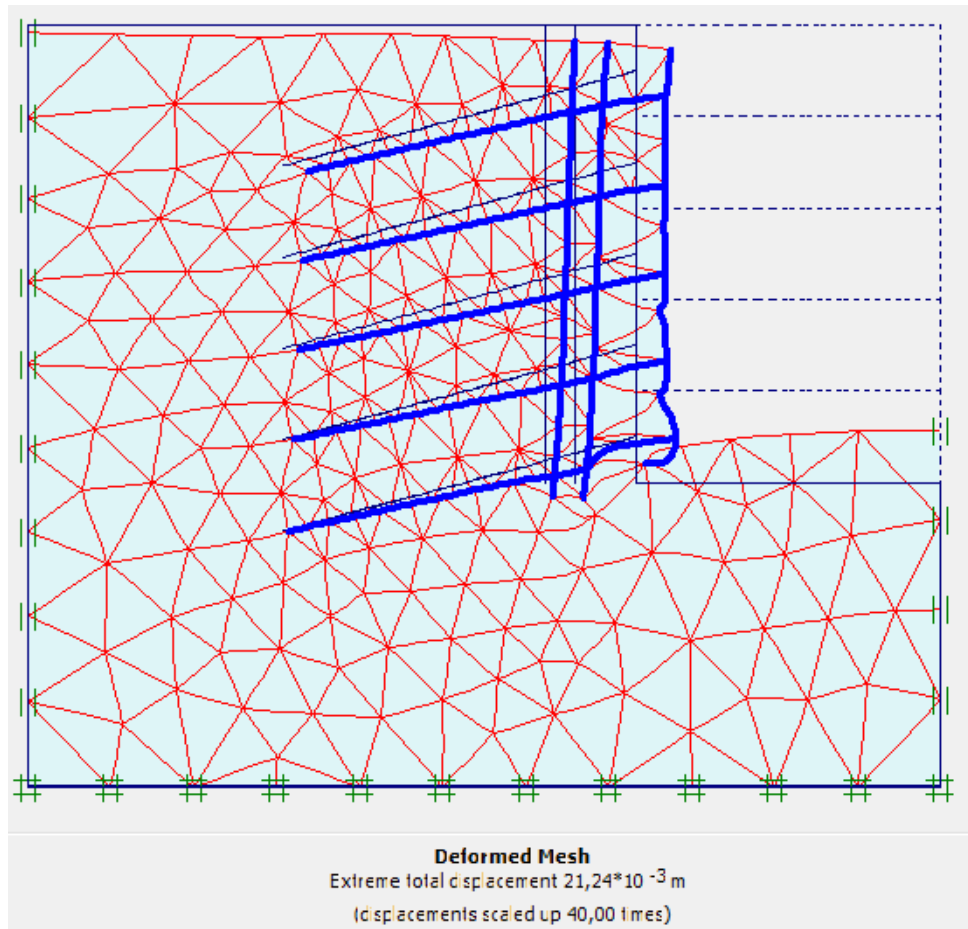
- Análise 3: 7,5_S3_S'H2_S'V2



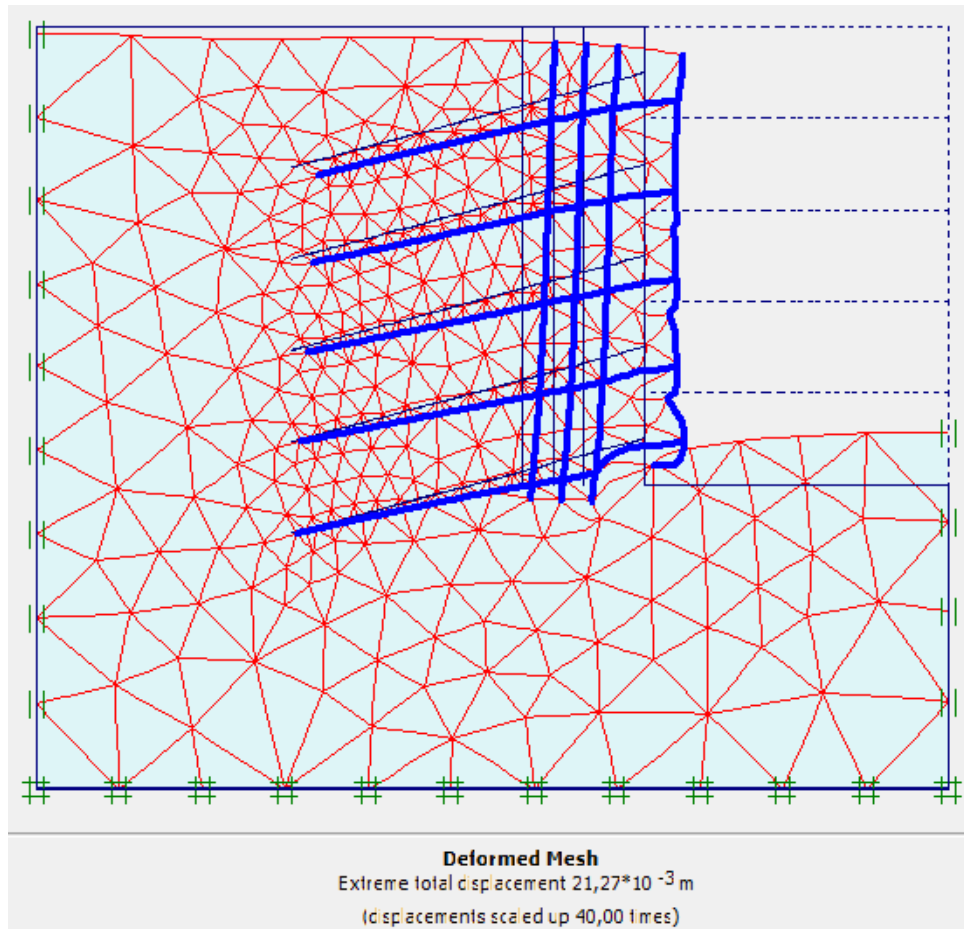
- Análise 4: 7,5_S4_S'H2_S'V2



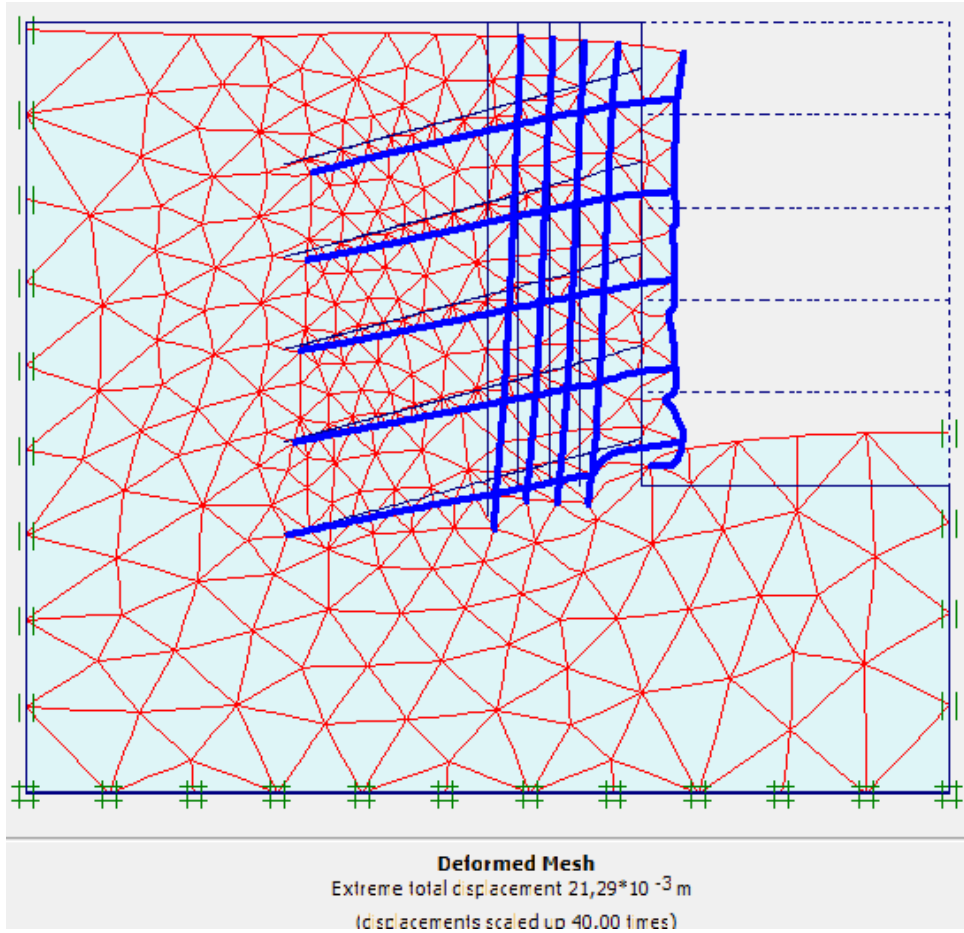
- Análise 5: 7,5_S2_S'H2_S'V0,5



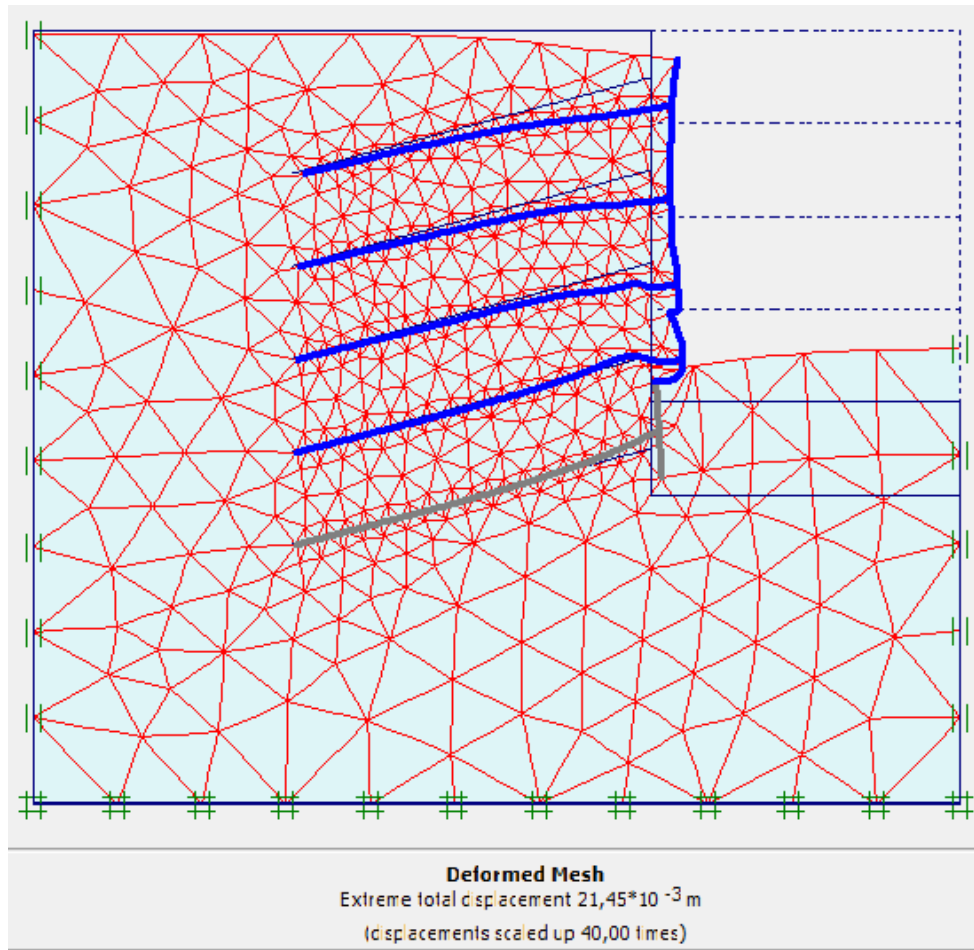
- Análise 6: 7,5_S3_S'H2_S'V0,5



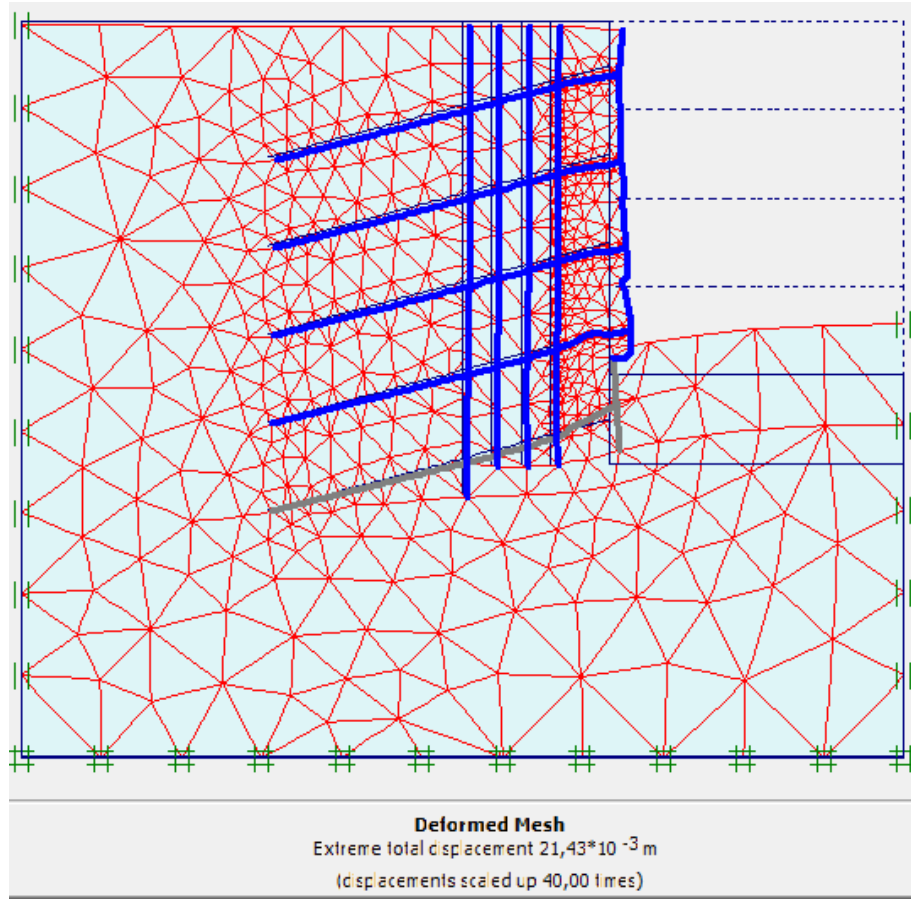
- Análise 7: 7,5_S4_S'H2_S'V0,5



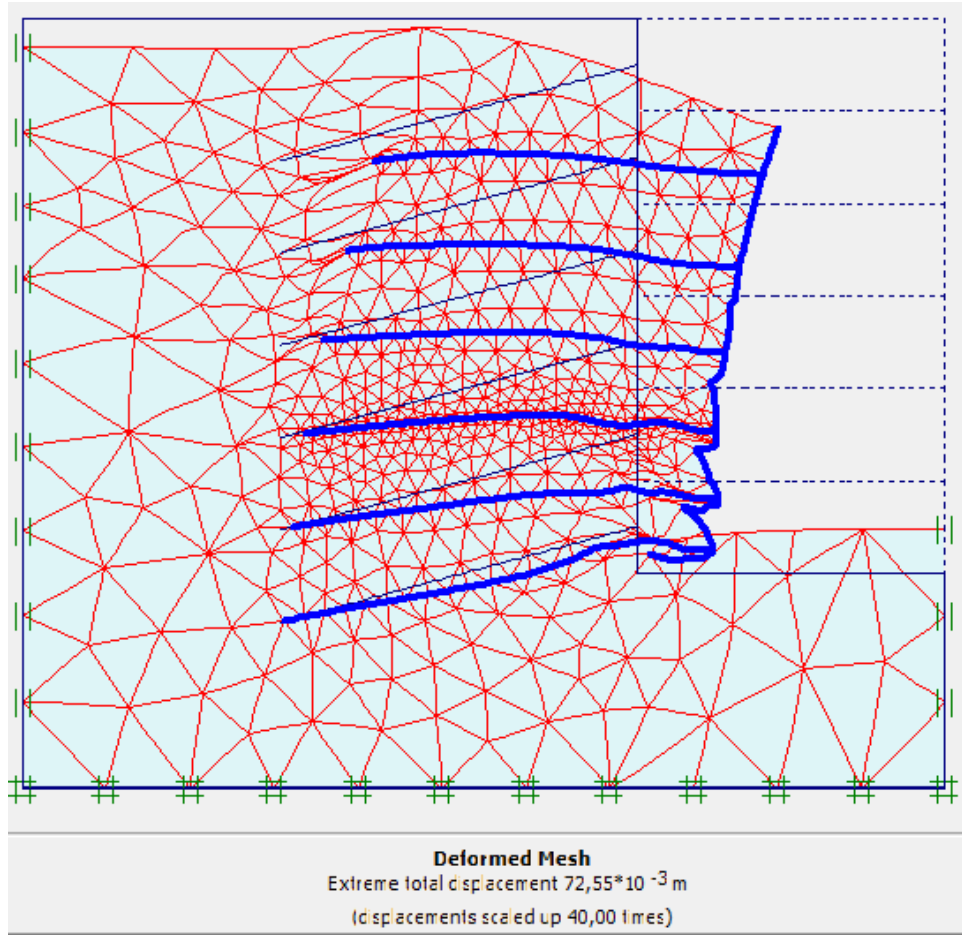
- Análise 8: 6_N0_S'H2



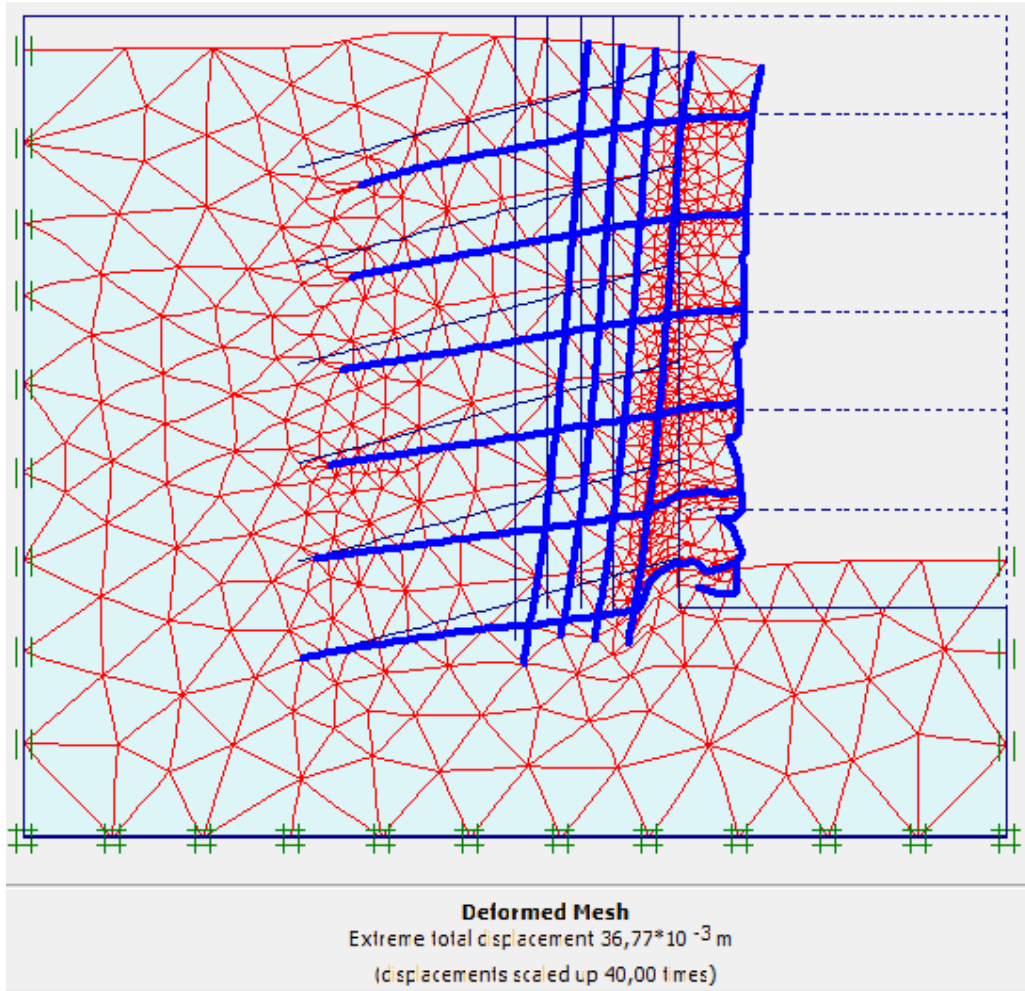
- Análise 9: 6_S4_S'H2_S'V0,5



- Análise 10: 9_N0_S'H2

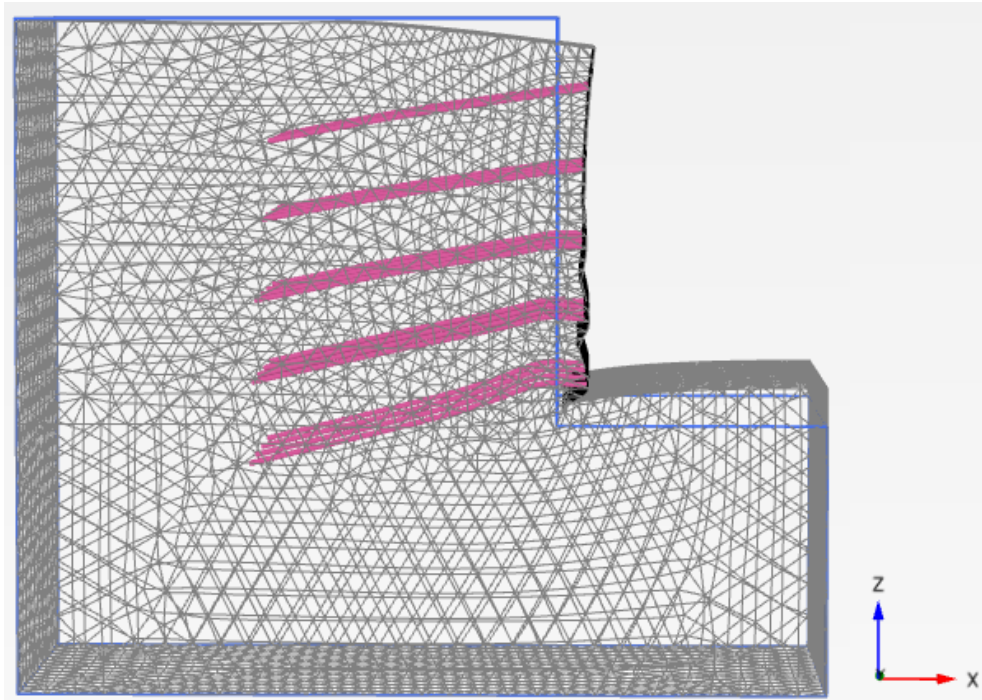


- Análise 11: 9_S4_S'H2_S'V0,5

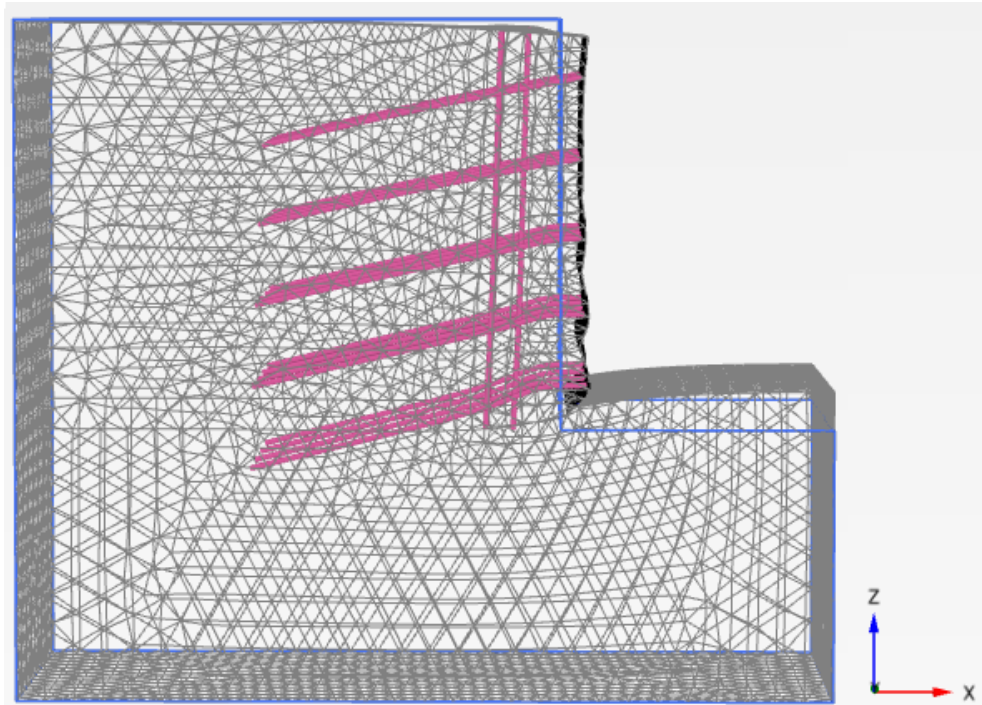


Apêndice F – Estrutura deformada aumentada em 40 vezes – plaxis 3D

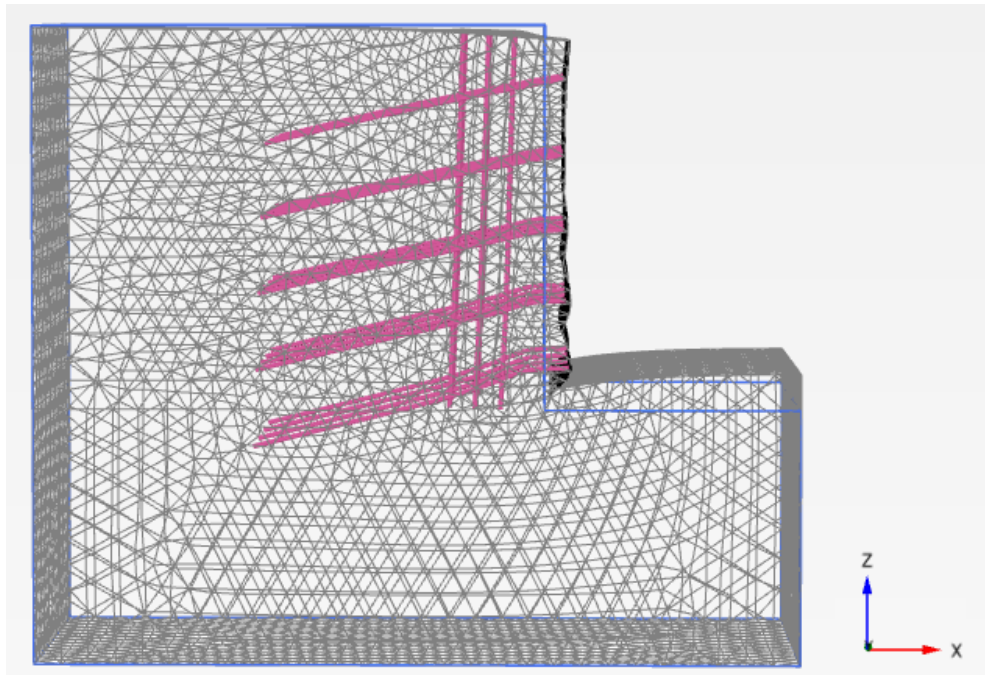
- Análise 1: 7,5_NO_S'H2



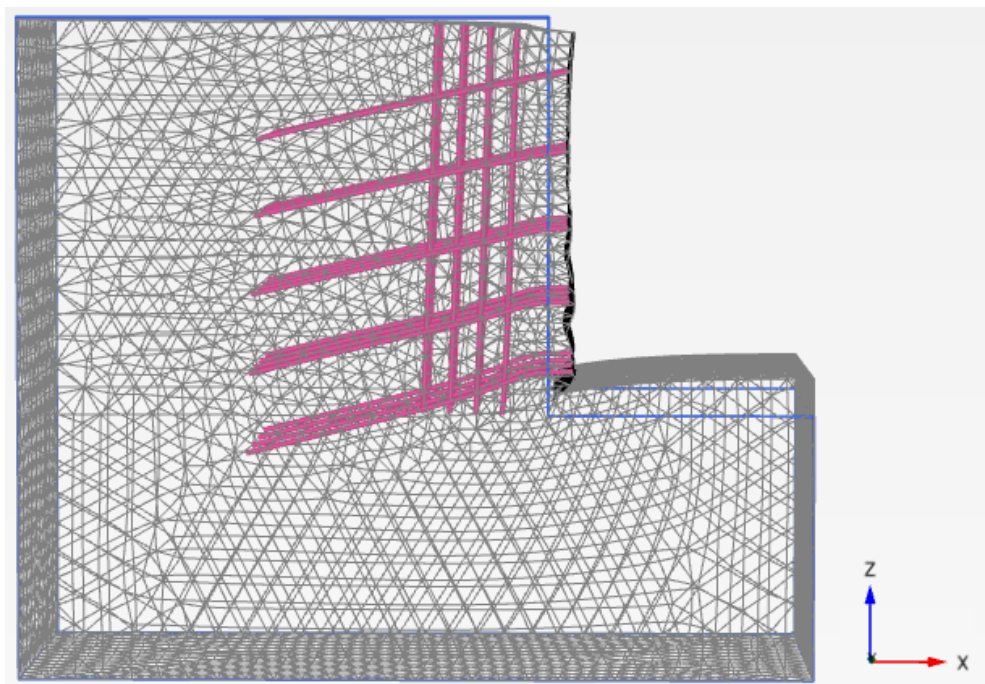
- Análise 2: 7,5_S2_S'H2_S'V2



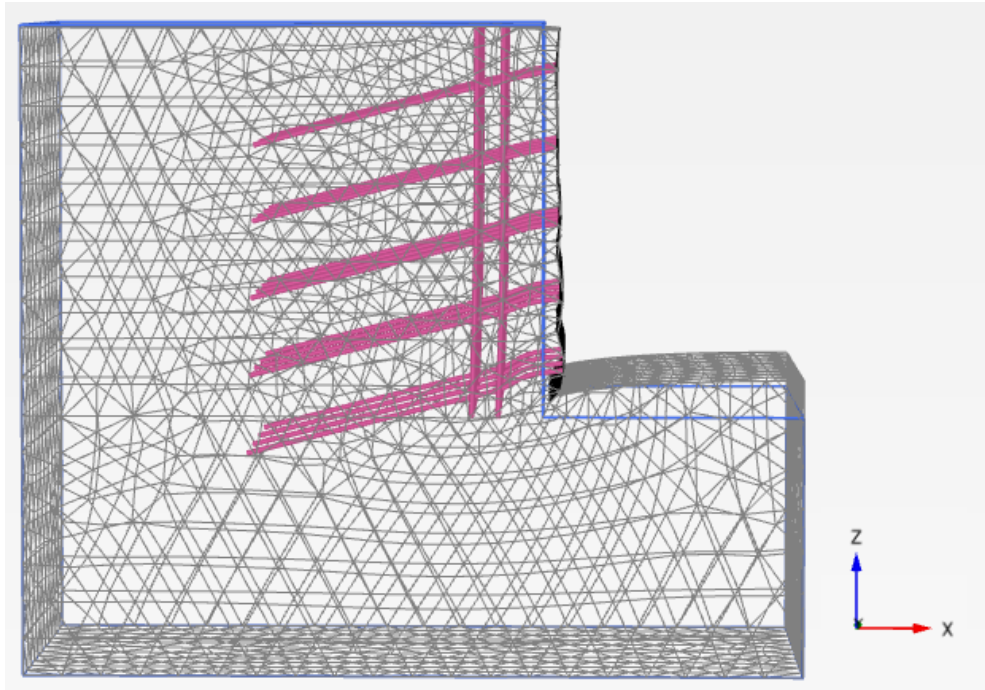
- Análise 3: 7,5_S3_S'H2_S'V2



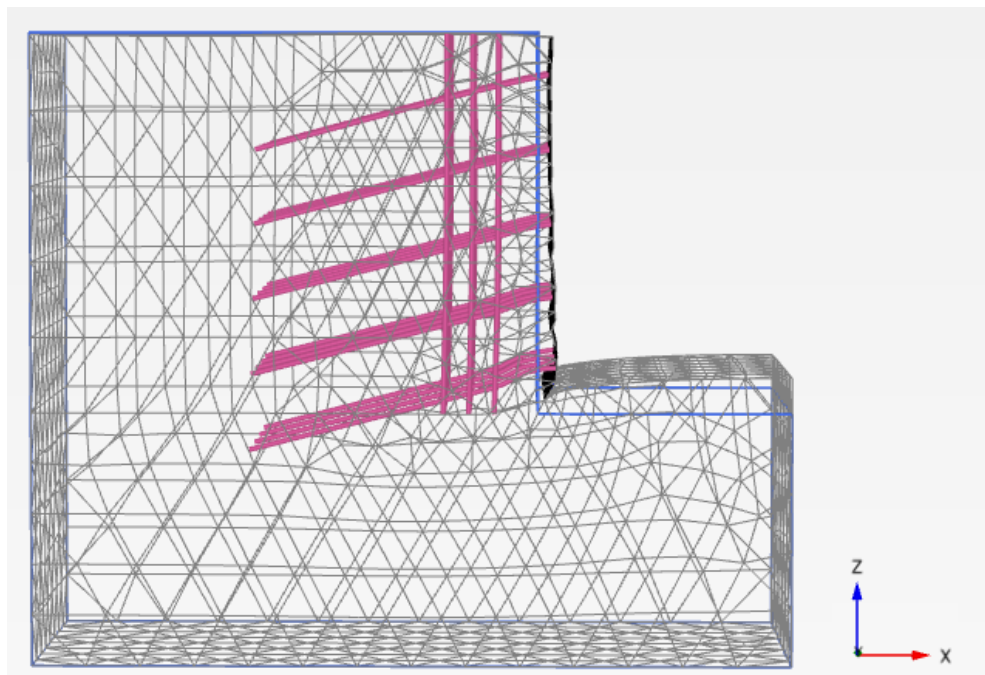
- Análise 4: 7,5_S4_S'H2_S'V2



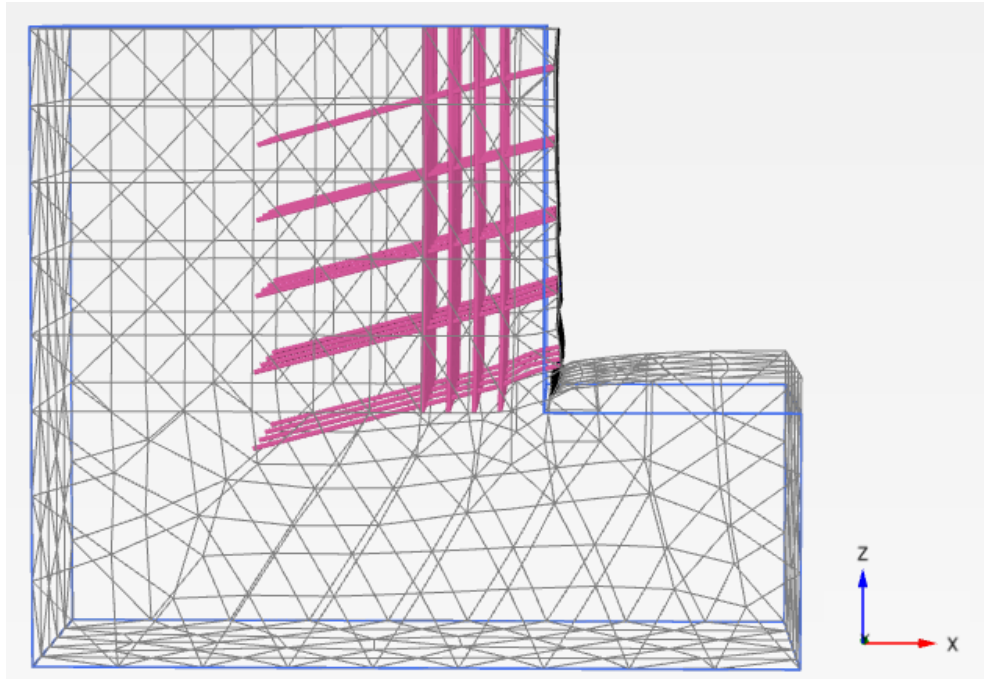
- Análise 5: 7,5_S2_S'H2_S'V0,5



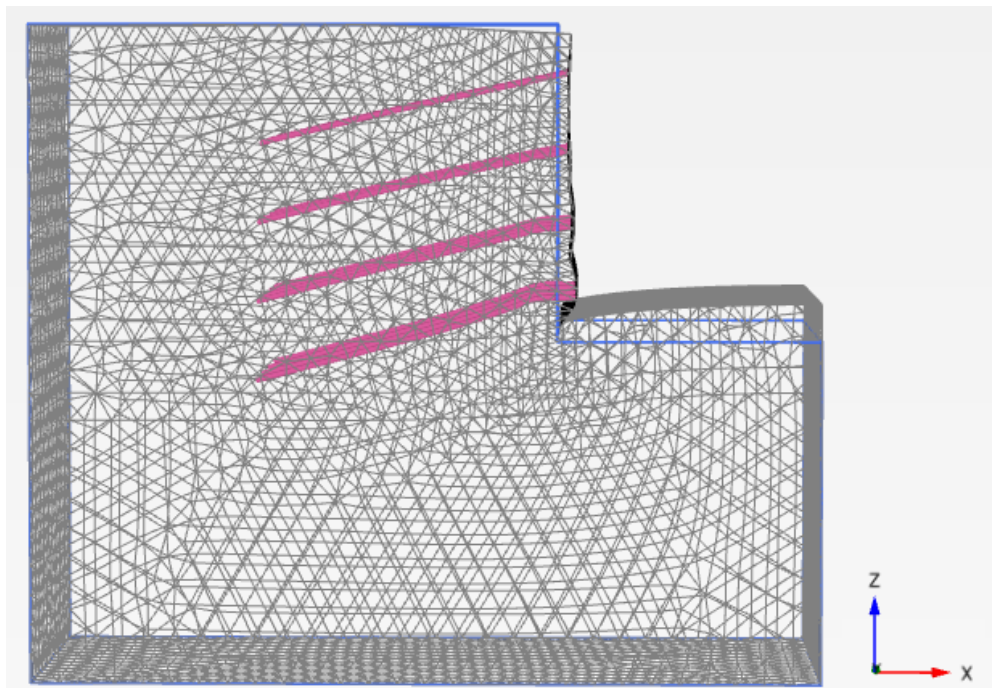
- Análise 6: 7,5_S3_S'H2_S'V0,5



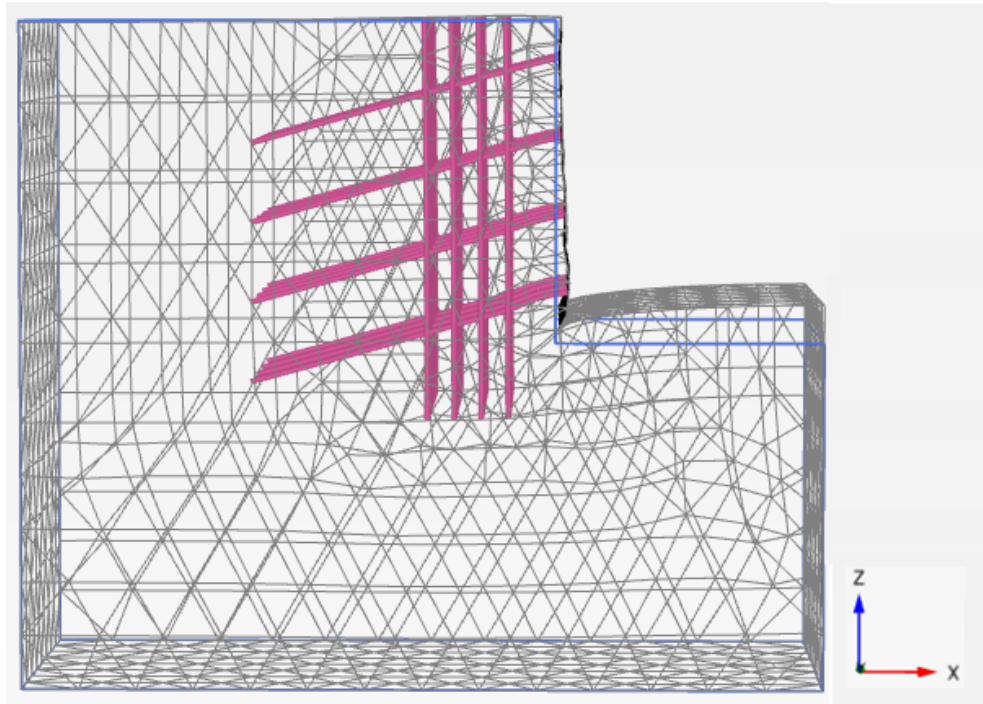
- Análise 7: 7,5_S4_S'H2_S'V0,5



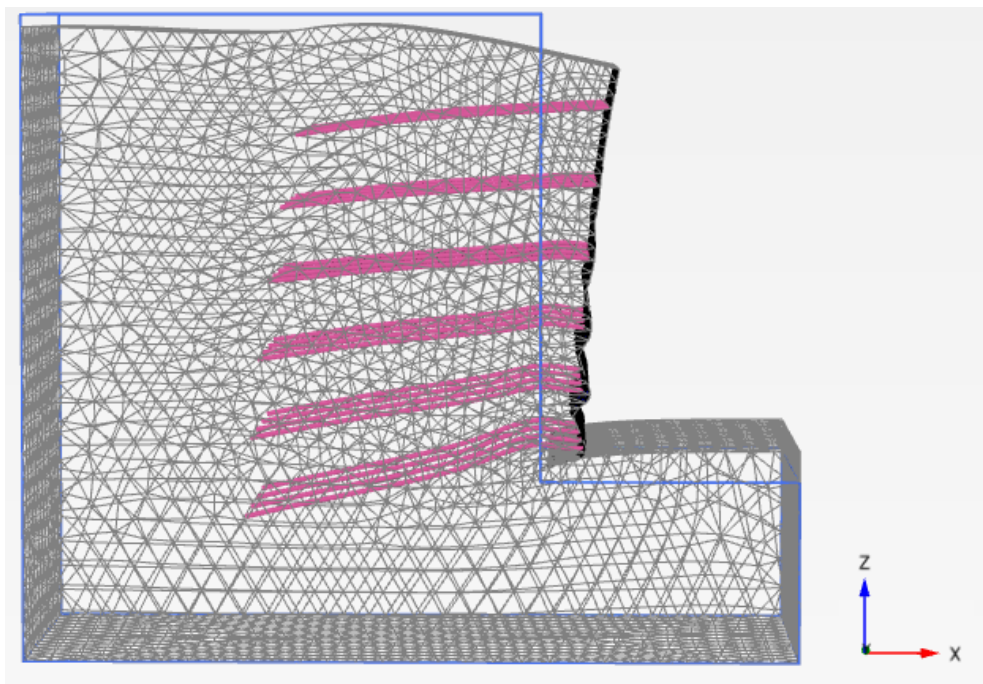
- Análise 8: 6_N0_S'H2



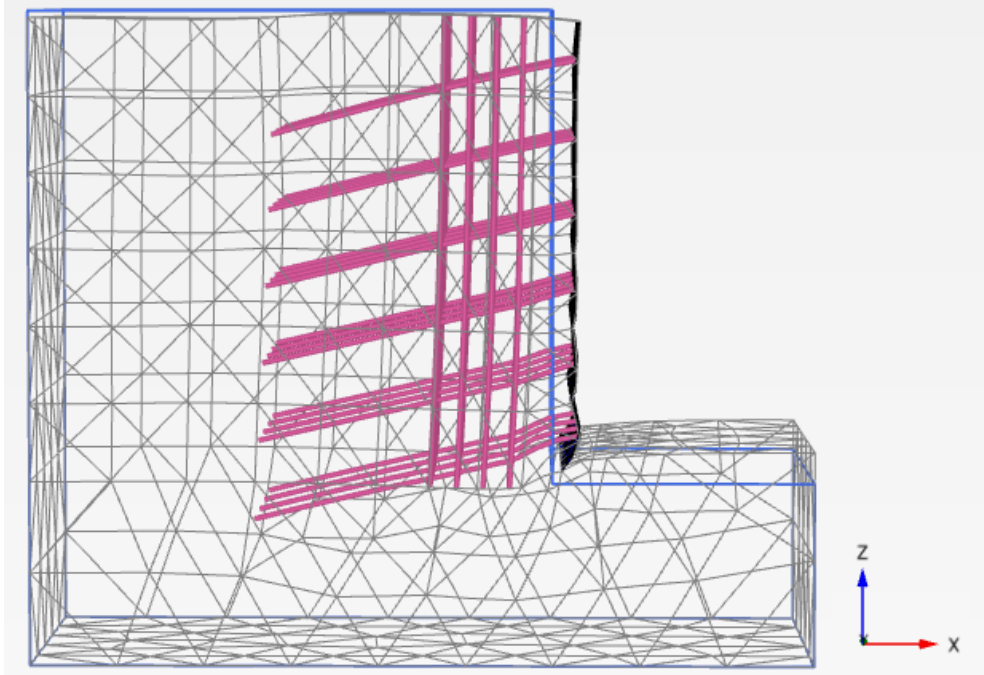
- Análise 9: 6_S4_S'H2_S'V0,5



- Análise 10: 9_N0_S'H2



- Análise 11: 9_S4_S'H2_S'V0,5



Anexo A - Artigo submetido para publicação

COMPUTATIONAL MODELLING OF THE EFFICIENCY OF VERTICAL INCLUSIONS IN SOIL NAILING STRUCTURES

Mario V. Riccio F.¹, B.Eng, MSc, DSc, Pos-doc

Thaís F. de Souza², B.Eng

¹Associate Professor, Graduate School of Engineering (PEC-UFJF), Federal University of Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil.

Email: mvrf1000@gmail.com

(corresponding author)

² Graduate student, Graduate School of Engineering (PEC-UFJF), Federal University of Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil.

Email: thais.fernandes@engenharia.ufjf.br

Tel: +55 (32) 2102 3425

List of Symbols

γ_{unsat} = specific weight unsaturated

γ_{sat} = specific weight saturated

k_x = coefficient of permeability in the x direction

k_y = coefficient of permeability in the y direction

H = height of excavation

E or E_s = elastic modulus of soil

ν = Poisson coefficient

c' = effective cohesion

ϕ' = angle of effective friction

Ψ = angle of dilatation

W = weight per meter of wall

δ_h = horizontal face displacement

δ_v = vertical displacement on top (crest)

E_{eq} = equivalent modulus of elasticity of nail (grout + steel bar)

E_g = modulus of elasticity of grout

E_b = modulus of elasticity of bar

A_b = cross-section area of reinforcement bar

A_g = cross-section area of grout cover

A = cross-section area of grouted soil nail

EA = axial stiffness

EI = bending stiffness

D = diameter of nail

S_v = vertical spacing of horizontal nail

S_h = horizontal spacing of horizontal nail

S_i = soil-nail relative stiffness

A_r = cross section area of the nails

E_r = elastic modulus of the steel bars

K = initial tangent modulus in the hyperbolic model of Duncan et al. (1980);

P_a = atmospheric pressure

q_s = pullout shear resistance

L = length of the nail

T_{skin} = pullout force

U_x = horizontal displacement

SF = safety factor

ΔSF = increase in the safety factor

Abstract

Soil nailing structures are structures that enable vertical or sub-vertical cuts, allowing greater use of space. This type of structure is present in urban areas, road and railways, for example. Through the insertion of nails in the soil mass increases the safety factor against the slope failure and in this way it is possible to maintain cuts in the sub-vertical or even vertical condition. In the classic technique the nails are positioned in the sub-horizontal position. Recently, in Brazil, it has been introduced the use of sub-vertical or vertical nails behind the face of the structure. The aim of this variant of the classical technique is to increase the stability of the excavation, increasing the safety factor against rupture and reduce the final horizontal deformations. The objective of this research was to verify the efficiency of the use of vertical nails positioned close to the face, verifying if these nails contribute to reduction of the traction generated in the sub-horizontal nails, reduction of the horizontal deformations of the face and soil mass and increase of the safety factor of the structure against failure. To model hypothetical structures was used the finite element programs PLAXIS 2D v8.2 and PLAXIS 3D v.2017. The analyses were carried out considering structures with ordinary soil-nail relative stiffness (S_i) and others with low S_i , to verify if a less rigid system undergoes significant changes with the introduction of vertical nails, since a very rigid system can make the use of vertical nails inefficient. The results showed that there are gains for the reduction of horizontal displacements and traction in the sub-horizontal nails, but for this it was necessary to use a very high number of vertical nails, which is not economically feasible. Also, significant gains occur only the in the cases of structures with low S_i , i.e., structures not used normally in the practice.

Keywords: soil nailing, efficiency of verticals nails, computational analyses, relative stiffness.

Introduction

Soil nailing structures are structures that enable vertical or sub-vertical cuts, allowing excavations with considerable depth and suitable safety factor against failure. This technology is used in infrastructure works such as highways and railways and in urban areas. The principle of soil nails consists of introducing nails into the soil mass as it is excavated (top-down method). In the soil nail as the deformations occurs, the efforts on the nails are mobilized, as axial tension. The nails are not pre-stressed, as in the anchored curtain. Typically the face of structure is coated with wide wire steel mesh and shot concrete. In the classic technique the nails are positioned in the sub-horizontal position. Recently, in Brazil and some works, the sub-vertical or vertical installation has been used behind and near to the face of the structure, in addition to the sub-horizontal nails. As an example, Silva (2015) can be observed, where was monitored a soil nail structure where, in addition to the sub-horizontal nails, 4 vertical nails lines were used behind and parallel to the face of the structure. Also Abramento et al. (2016) present the use of vertical nails in soil nails structures.

The main objective of this study is verify if the use of sub-vertical or vertical nails behind and near the face has any efficiency, as increase in the safety factor against failure, reduction of horizontal deformations and a decrease in the axial tension on sub-horizontal nails.

Over the years, some studies have been developed using numerical models in soil nailing, such as, Cheuk et al. (2005), Fan and Luo (2007), Zhou et al. (2009), Wei and Cheng (2010), Kim et al (2013), Bonab and Razavi (2016), Moniuddin et al. (2016), Rawat and Gupta (2016), Villalobos et al. (2018), among others.

Some studies on soil nailing have also been done in laboratories (reduced model or true scale) as Tan et al. (2008), Yin et al. (2009), Seo et al. (2012), Zhang et al. (2013), Tokhi et al. (2016), Gursaud et al. (2017), Ye et al. (2018).

Some examples of recent studies carried out in the field are Turner and Jensen (2005), Ehrlich and Silva (2015), Mickovski et al. (2016), among others.

However, any of these studies (numerical, laboratory and field) does not contemplate the analysis of the efficiency of the use of vertical nails. The aim of this research was to verify the efficiency of the use of vertical nails positioned next to the face, verifying especially if these nails contribute to: a) reduction of the axial tension generated in the sub-horizontal nails; b) reduction of the horizontal deformations of the face of excavation and c) increase in the safety factor. The research was developed using the program PLAXIS 2D v8.2 and PLAXIS 3D v.2017 and the results showed that significant gains in the mechanical behavior of soil nailed excavation occur only in the cases of structures with low soil-nail relative stiffness (not found normally in the practice) and it is necessary a great amount of vertical nails to achieve this improvement.

2 – Performed numerical analysis

In this item the performed analyses are presented. The modelling of soil nailing structures were done accounting 2D and 3D condition, using PLAXIS 2D v.8.2 and PLAXIS 3D v.2017, respectively. For 2D analyses two elements available in PLAXIS 2D were considered to represent the nails: element “geogrid” and element “plate”. For 3D analyses it was considered the element “embedded beam”.

2.1 – Analysis PLAXIS 2D with “geogrid” element.

The PLAXIS 2D software does not have an specific element to represent the nail (steel bar plus grout). Therefore, it was necessary to use the element “geogrid” to represent the nail. This element works only with axial stiffness. For the horizontal spacing to be defined, a small

0.5m length section of the “node-to-node” element of PLAXIS 2D was used, with the axial stiffness was equal in both the “node-to-node” element and the “geogrid” element. The Table 2 presents the analyses carried out in 2D PLAXIS using the “geogrid” element. Analysis 1 is the standard analysis and from this, others were made where the amounts of vertical nails and the horizontal spacing of the vertical nails were varied. These variations are important to see the behavior of the structure in the presence of different amounts of vertical nails and to analyze the influences of these nails.

Table 2 - Analyses performed in the PLAXIS 2D with the “geogrid” and “plate” element.

Number	Analysis	Height (m)	Inclination horizontal nail (°)	Vertical nail	Lines of vertical nails behind face	Horizontal spacing horizontal nail (m)	Horizontal spacing vertical nail (m)	Relative stiffness (S _i)
1	7.5_N0_S'H2	7.5	15.0	No	0	2.0	-	3.978
2	7.5_Y2_S'H2_S'V2 *	7.5	15.0	Yes	2	2.0	2.0	3.978
3	7.5_Y3_S'H2_S'V2	7.5	15.0	Yes	3	2.0	2.0	3.978
4	7.5_Y4_S'H2_S'V2	7.5	15.0	Yes	4	2.0	2.0	3.978
5	7.5_Y2_S'H2_S'V0,5	7.5	15.0	Yes	2	2.0	0.5	3.978
6	7.5_Y3_S'H2_S'V0,5	7.5	15.0	Yes	3	2.0	0.5	3.978
7	7.5_Y4_S'H2_S'V0,5	7.5	15.0	Yes	4	2.0	0.5	3.978
8	6_N0_S'H2	6.0	15.0	No	0	2.0	-	3.978
9	6_Y4_S'H2_S'V0,5	6.0	15.0	Yes	4	2.0	0.5	3.978
10	9_N0_S'H2	9.0	15.0	No	0	2.0	-	3.978
11	9_Y4_S'H2_S'V0,5	9.0	15.0	Yes	4	2.0	0.5	3.978

*7.5 = excavation height; Y = yes for vertical nails; 2 = for number of vertical nails lines behind face; S' = horizontal spacing: S'H is horizontal spacing of the sub-horizontal nails and S'V is horizontal spacing of the vertical nails. The values followed for these symbols are the values adopted for the spacing.

2.2 – Analysis PLAXIS 2D with “plate” element

The nail element can also be modeled using the “plate” element, present in the PLAXIS 2D software. This element considers both axial stiffness and bending stiffness, unlike element

“geogrid”. The use of element “plate” required an equivalency transformation for real condition (3D) to the 2D condition. It was done by dividing the axial stiffness (EA) and bending stiffness (EI) by the horizontal spacing of nails (sub-horizontal and vertical), as presented by equations **Erro! Fonte de referência não encontrada.**2 and 3**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ahead and proposed by Rawat and Gupta (2016). The Table 1 presents the analysis made in 2D PLAXIS using the “plate” element. Analysis 1 is the standard analysis and from this, others were made varying the number of lines of vertical nails behind face and the horizontal spacing between vertical nails, in the same way that was done using element “geogrid”.

2.3 – Analysis PLAXIS 3D

In the PLAXIS 3D software there is the “embedded beams” element, which can represent the nail. In this case, the values of equivalent modulus of elasticity (equation 1, ahead) and the diameter of the nail (D) are input data, as the vertical and horizontal spacing between nails. In the PLAXIS 3D there is no need of make axial and bending stiffness transformation using equations (2) and (3). The

Table 3 presents the analyses performed in PLAXIS 3D. Analysis 1 is the standard analysis and from this other analyses were done. Analyses were also carried out considering low soil-nailing relative stiffness (S_i) defined ahead by equation (4). These analyses are the numbers 12, 13 and 14 in the Table 2 and the “LS” (low stiffness) indicate these ones.

Table 3 - Analyses performed in the PLAXIS 3D.

Number	Analysis	Height (m)	Inclination horizontal nail (°)	Vertical nail	Lines of vertical nails behind face	Horizontal spacing horizontal nail (m)	Horizontal spacing vertical nail (m)	Relative stiffness (S _i)
1	7.5_N0_S'H2	7.5	15.0	No	0	2	-	3.978
2	7.5_Y2_S'H2_S'V2 *	7.5	15.0	Yes	2	2	2	3.978
3	7.5_Y3_S'H2_S'V2	7.5	15.0	Yes	3	2	2	3.978
4	7.5_Y4_S'H2_S'V2	7.5	15.0	Yes	4	2	2	3.978
5	7.5_Y2_S'H2_S'V0,5	7.5	15.0	Yes	2	2	0.5	3.978
6	7.5_Y3_S'H2_S'V0,5	7.5	15.0	Yes	3	2	0.5	3.978
7	7.5_Y4_S'H2_S'V0,5	7.5	15.0	Yes	4	2	0.5	3.978
8	6_N0_S'H2	6.0	15.0	No	0	2	-	3.978
9	6_Y4_S'H2_S'V0,5	6.0	15.0	Yes	4	2	0.5	3.978
10	9_N0_S'H2	9.0	15.0	No	0	2	-	3.978
11	9_Y4_S'H2_S'V0,5	9.0	15.0	Yes	4	2	0.5	3.978
12	9_N0_S'H3_LS**	9.0	15.0	No	0	3	-	1.905
13	9_Y4_S'H3_S'V2_LS	9.0	15.0	Yes	4	3	2	1.905
14	9_Y4_S'H3_S'V0,5_LS	9.0	15.0	Yes	4	3	0.5	1.905

*7.5 = excavation height; Y = yes for vertical nails; 2 = for number of vertical nails lines behind face; S' = horizontal spacing; S'H is horizontal spacing of the sub-horizontal nails and S'V is horizontal spacing of the vertical nails. The values followed for these symbols are the values adopted for the spacing.

** LS represent the low soil-nail relative stiffness (S_i) condition.

3 – Computational models

In this item the properties and parameters used in the models are presented, as well as the considerations made to allow the modelling in PLAXIS 2D and PLAXIS 3D.

3.1 - Equivalent 3D to 2D parameters

PLAXIS 2D software v8.2 and PLAXIS 3D v.2017 were used to carry out the numerical analysis. In order to perform the analysis in PLAXIS 2D it was necessary to create

equivalence between 3D and 2D parameters and evaluate an equivalent elastic modulus for the nail, such as it is composed by a steel bar and grout. The equivalent elastic modulus, E_{eq} , can be evaluated by Equation (1). The value of E_{eq} is used in both analyses 2D (with “geogrid” or “plate”) and 3D. From the fundamentals of strength of materials, E_{eq} can be determined as (Rawat and Gupta, 2016):

$$E_{eq} = \frac{E_b \cdot A_b + E_g \cdot A_g}{A} \quad (1)$$

where: E_{eq} = equivalent modulus of elasticity of the soil nail (steel bar and grout); E_g = modulus of elasticity of grout, E_b = modulus of elasticity of steel bar; A_b = cross-section area of steel bar; A_g = cross-section area of grout; A = cross-section area of the soil nail (steel bar plus grout).

The geogrid element requires axial stiffness and, for horizontal spacing to be defined, a small 0.50m stretch of the anchor to anchor element is used. For the element "plate", the axial stiffness (EA) and bending stiffness (EI) are calculated dividing it ones by the horizontal spacing (Rawat and Gupta, 2016), according to the Equations (2) and (3).

$$EA = \frac{E_{eq}}{S_h} \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (2)$$

$$EI = \frac{E_{eq}}{S_h} \cdot \left(\frac{\pi D^4}{64} \right) \quad (3)$$

Where: EA = axial stiffness; EI = bending stiffness; E_{eq} is the equivalent modulus of elasticity of the nail (steel bar plus grout); D is the diameter of nail; S_h is the horizontal spacing of sub-horizontal nail or vertical nail.

According to Ehrlich and Mitchell (1994), S_i is the soil-nail relative stiffness index, defined by the equation (4).

$$S_i = \frac{A \cdot E_{eq}}{K \cdot P_a \cdot S_v \cdot S_h} \quad (4)$$

Where: A and E_r are the cross section area and elasticity modulus of the nails (steel bar plus grout), respectively; K is the initial tangent modulus in the hyperbolic model of Duncan et al. (1980); $P_a = 101.35$ kPa is the atmospheric pressure (unit constant); S_v and S_h are the vertical and horizontal spacing of the sub-horizontal nails (define the area of influence); and $K \cdot P_a$ is equivalent to modulus of deformability of the soil (E_s).

Soil nailing structures were modeled with heights of 6.0m, 7.5m and 9.0m meters. Cases with and without the use of vertical nails were considered. Variations were made in the spacing of the sub-horizontal and vertical nails. It was also made a variation in the number of lines of vertical nails located behind the face, being considered from 2 to 4 lines of vertical nails. In addition, the bar diameter and soil properties were also varied in the PLAXIS 3D models. Thus, the stiffness of the structure became smaller and the efficiency of vertical nails used was verified in structures of low soil nail relative stiffness (S_i).

For the pullout resistance q_s , it was adopted the value of 500 kN/m². This value was considered high, so that during analyses, there was no risk of pullout, since this is not a goal of analysis. Therefore, since a pullout resistance (q_s) of 500 kN/m² was used, the diameter of the nail (D) is 0.1m and the length (L) is equal to 6m, the pullout force ($T_{pull-out}$) and pullout force per meter (T_{skin}) was evaluated by Equations (5) and (6). So, the value of T_{skin} (parameter adopted in PLAXIS) is equal to 157 kN/m. By simplifying the real behavior a constant force was defined along the nail.

$$q_s = \frac{T_{\text{pull-out}}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (5)$$

$$T_{\text{skin}} = \frac{T_{\text{pull-out}}}{L} \quad (6)$$

where: $T_{\text{pull-out}}$ is the pullout force according to the q_s and geometry of nail; T_{skin} is the pullout force per meter; D is the diameter of the nail; and L is the length of the nail.

3.1 – Models with ordinary soil-nail relative stiffness

As mentioned, the models were made in PLAXIS 2D with element “geogrid” and “plate” and in PLAXIS 3D. The properties of the materials were defined. The

Table 4 presents the properties and parameters of the soil mass, the Table presents the properties of nails, and the Table5 presents the properties of the face (shot concrete).

Table 4 - Properties and parameters of soil.

Properties	
Model	Mohr-Coulomb
Type of behavior	Drained
γ_{unsat} (kN/m ³)	18.0
γ_{sat} (kN/m ³)	20.0
Kx e Ky (m/dia)	$1.7 \cdot 10^{-3}$
Parameters	
E_s (kN/m ²)	$3 \cdot 10^4$
ν [-]	0.30
c' (kN/m ²)	10.0
ϕ' (°)	35.0
ψ (°)	2.0

Table 4 - Properties of nails.

Generals Properties	
----------------------------	--

Hole diameter (mm)	100
Steel bar diameter (mm)	36.0
Length (m)	6.0
Model	Elastic
Work force (kN)	500
EA (kN)	$3,58 \cdot 10^5$
$T_{skin, start}$ (kN/m)	157
$T_{skin, end}$ (kN/m)	157

Table 5 - Face shot concrete properties

General Properties	
Model	Elastic-linear
EA (kN/m)	$1,05 \cdot 10^6$
EI (kNm ² /m)	218,4
Thickness (m)	$5 \cdot 10^{-2}$
w(kN/m/m)	1,25
ν [-]	0,20

Figure 1 shows the model in PLAXIS 2D with 2 lines of vertical nails behind face (analysis 7,5_Y2_S'H2_S'H2) with the “geogrid” element representing the nail, Figure 2 presents the same analysis with the “plate” element representing the nail and Figure 3 also shows the same analysis, but now modelled in PLAXIS 3D.

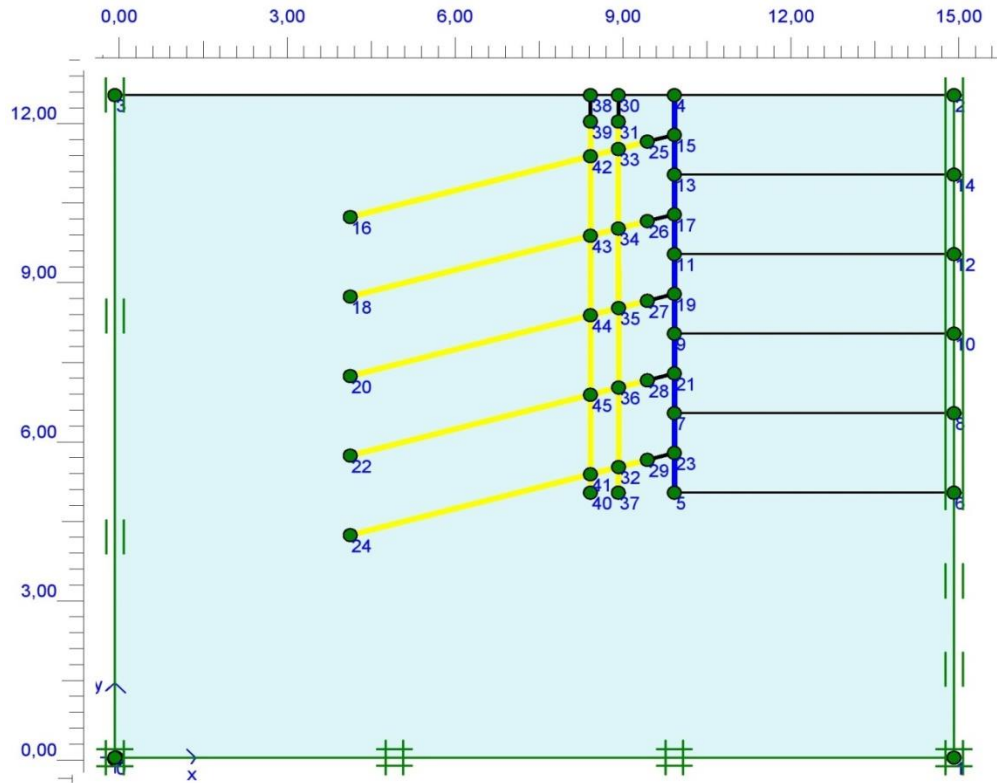


Figure 1: Analysis with 2 lines of vertical nails with "geogrid" element.

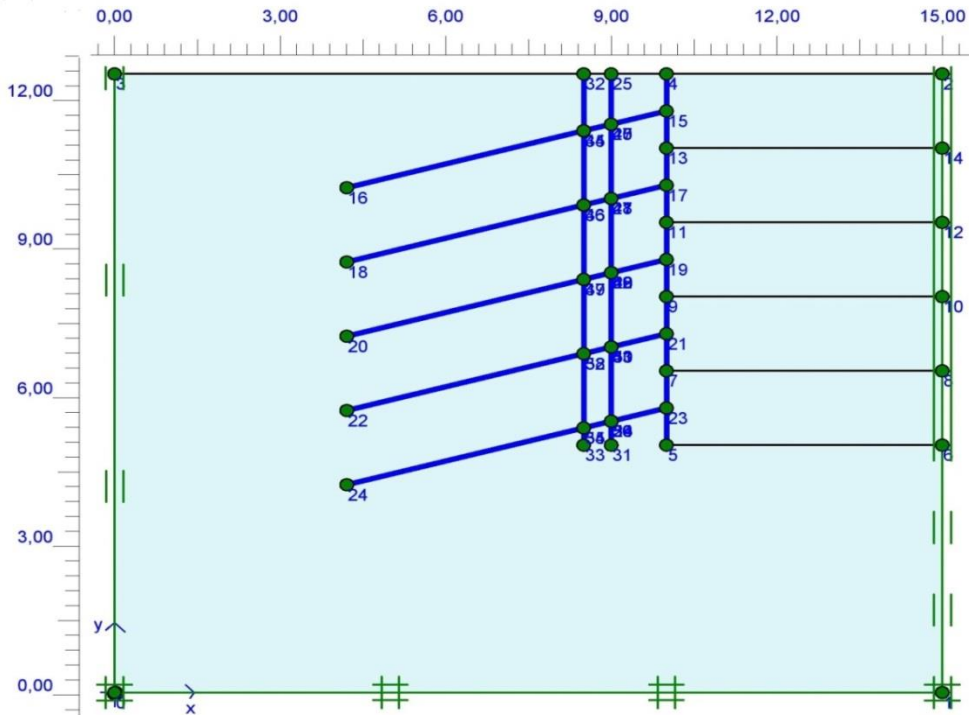


Figure 2: Analysis with 2 lines of vertical nails with “plate” element.

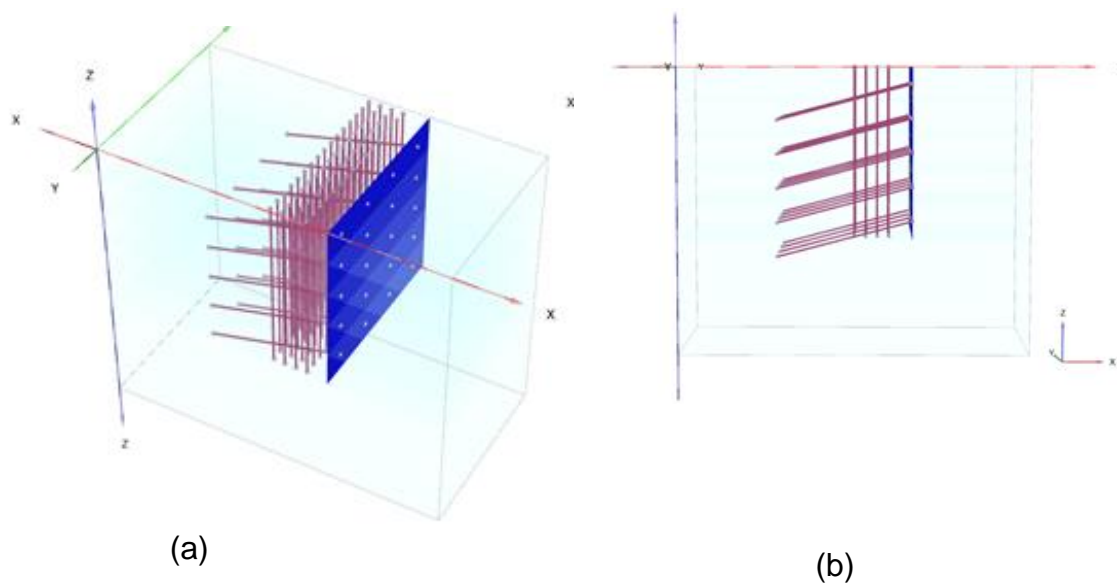


Figure 3: Analysis with 4 lines of vertical nails in PLAXIS 3D. a) perspective view; b) view in the plane xz.

The finite element mesh type used was the very fine mesh. For example, the mesh was composed by 1147 elements and 10067 nodes in the analysis 7.5_N0_S'H2, considering condition 2D and the element “geogrid”. Considering the analysis 2D with the “plate” element, the very fine mesh was composed by 1208 elements and 9753 nodes. In both models, the time required by the program for calculation, including determination of safety factor, was approximately 3 hours. In the PLAXIS 3D, the same analysis counted on 149894 elements and 210633 nodes, and the time required for calculation was approximately 10 hours.

3.2 – Models with low soil-nail relative stiffness

The vertical nails could be evaluated in models with low relative stiffness, these models with this characteristic (low S_i , Equation 4) were carried out only in PLAXIS 3D, it is the analysis 12, 13 and 14 of the

Table 3. For this, the soil parameters, the horizontal spacing of the sub-horizontal nails and the diameter of the bar and grouted cover were changed. The Table 5 presents the properties and parameters of soil used in models with low relative stiffness and the

Table 6 presents the properties of nails used in models with low relative stiffness, but these properties were only used in the sub-horizontal nails, for the vertical nails the properties presented in Table were maintained.

Table 5 - Properties and parameters of soil - models with low relative stiffness.

Properties	
Model	Mohr-Coulomb
Type of behavior	Drained
γ_{unsat} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20
Kx e Ky (m/dia)	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Parameters	
E (kN/m ²)	$12,5 \cdot 10^3$
ν [-]	0,30
c' (kN/m ²)	8
ϕ' (°)	30
ψ (°)	2

Table 6 - Properties of nails - models with low relative stiffness.

General properties	
Hole diameter (mm)	75
Bar diameter (mm)	10
Length (m)	6.0
Model	Elastic
Work force (kN)	60

EA (kN)	$1,07 \cdot 10^5$
$T_{skin, start}$ (kN/m)	117
$T_{skin, end}$ (kN/m)	117

The purpose of this type of analysis is to verify if a less rigid system undergoes significant changes with the introduction of the vertical nails. A very rigid system in terms of sub-horizontal nails can become the use of vertical nails useless. In this case, the generated finite element mesh counted on 151708 elements and 213192 nodes for the analysis 9_N0_S'H3_LS, for example. The time required for calculation including determination of safety factor is also about 10 hours.

4 – Considerations about soil-nail relative stiffness (S_i)

A very important point to be considered in the analyses is the relative stiffness of the soil-nail structures. This is because a structure with very rigid sub-horizontal nails can make the action of the vertical nails ineffective. For this, the soil-nail relative stiffness (S_i) of some works carried out in Brazil, presented by Abramento et al. (2016), was calculated. The works have slopes varying between 80° and 90° and heights between 4 and 14 meters. Thus, different values of soil modulus of elasticity, namely 10MPa, 20MPa and 30 MPa were adopted. The results are presented in Figure 4.

Knowing that the analyzes conducted in this work reproduces structures with S_i of 3.978, according to Table 2 and

Table 3, and that the modulus of elasticity adopted for the soil was of 30 MPa, it is perceived that the relative stiffness of these analyses are really usual, according to the Figure 4.

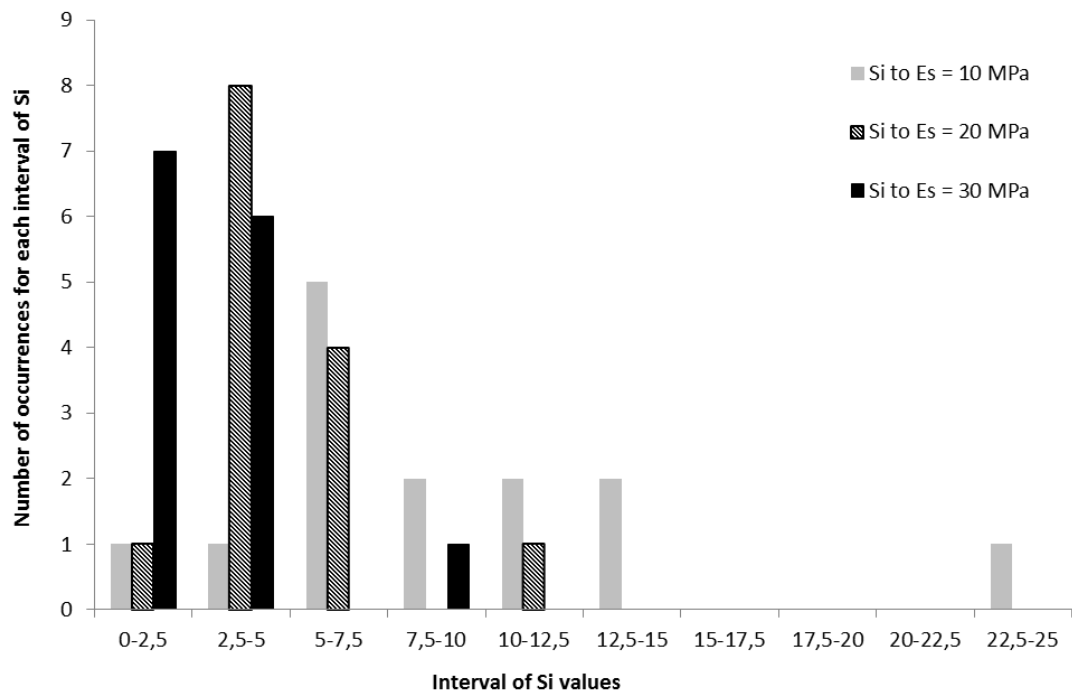


Figure 4: Results of relative stiffness for works carried out in Brazil, Abramento et al. (2016).

5 – Results and discussion

In this section the results obtained by the computational modeling, including 2D “Geogrid”, 2D “Plate” and 3D approaches are presented and discussed. The results presented accounts for horizontal face displacement, horizontal face distribution, maximum horizontal versus maximum vertical displacement on top, safety factor and summation of maximum tension on nails.

5.1 – Horizontal face displacement (2D plate/ geogrid, 3D), end of construction

The Figure 5 shows the results of horizontal face displacement along depth and in the end of construction, considering 3D analysis. From Figure 5 it is possible to observe that the use of two, three or four lines of vertical nails behind face has very little influence on the referred displacements. All analysis showed in Figure 5 consider the horizontal spacing between vertical nails equal to 0.5m. So, according to the results there is no significant increase in the performance, in terms of horizontal face displacements, if two or four lines of nails behind face are used. Despite of the number of vertical nails lines used the pattern of displacement is almost the same, smaller displacements near base (7.5m depth) and tendency to a constant value above this depth. Maximum horizontal displacement generally occurred at the top of excavation with values ranging between 5.8mm and 7.0mm. For $\delta h = 7.0\text{mm}$ the relationship between displacement on top and height (H) of excavation ($\delta h/H$) is 0.001, that is greater than 1/10.000 (value associated to the mobilization of active earth pressure).

The Figure 6 presents results of horizontal face displacements for 6.0m, 7.5m and 9.0m of excavation depth, but considering two conditions to each depth: no use of any vertical nails and using four lines of vertical nails from behind face. Also, in these analyses it was considered that horizontal spacing between vertical nails is equal to 0.5m and the element used to represent the nail is the "geogrid". The Figure 7 provides results for the same analyses considered in Figure 6, but considering the element "plate", unlike "geogrid" to represent the nails. The Figure 8 presents results for the same analyses considered in Figures 6 and 7, but for 3D condition.

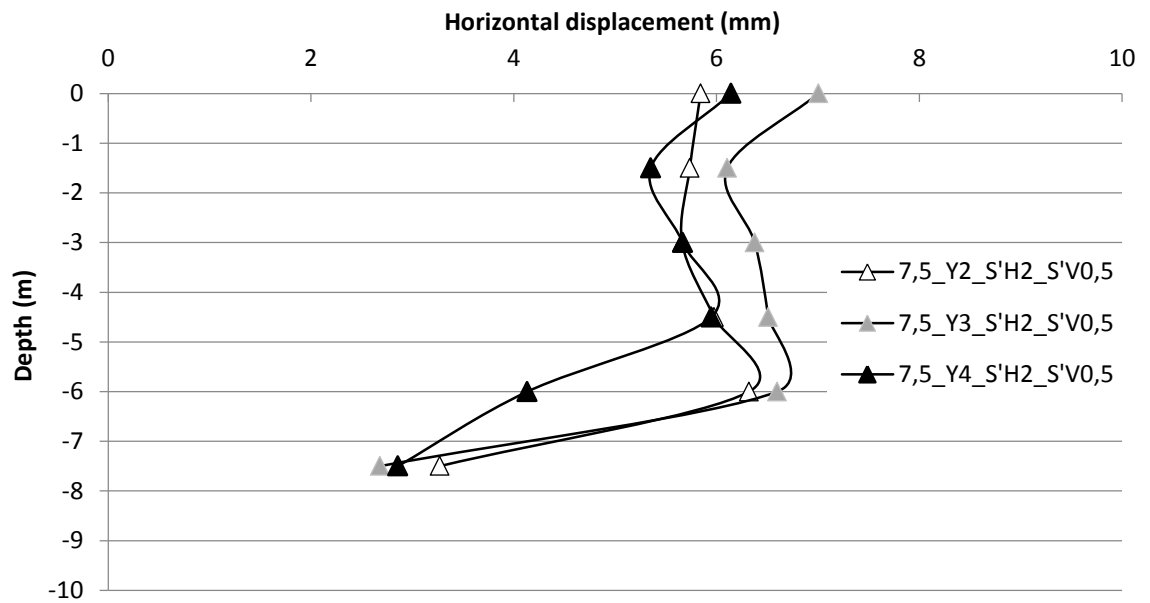


Figure 5 – Efficiency of vertical nails to reduce the horizontal face displacements, considering two, three and four nail lines behind face and 3D analysis.

The Figures 6 and 7 present results of horizontal face displacement accounting 2D condition and elements “geogrid” and “plate” to represent the nails, respectively.

Figure 6 compares two situations: without using the vertical nails and using vertical nails in four lines (behind face) and spaced horizontally by 0.5m. This analysis considers the element ‘geogrid’ to represent the nails. The analyses presented in Figure 6 consider height of excavation of 6.0m, 7.5m and 9.0m. From Figure 6 and considering the height of 6.0m it is possible to observe that the use of vertical nails have not produced any significant reduction in horizontal face displacement along depth, excepting the bottom of excavation (6.0m) that the reduction was 6.5mm to 1.5mm. In this condition the average displacement was 6mm along depth, excepting the bottom. It is interesting to observe that the deformations for 6m height of excavation tend to be constant along depth. The smaller deformation at bottom can be associated with the toe resistance due to the presence of soil in front of excavation’s wall.

The results for 7.5m height showed similar behavior observed in the 6.0m height case, but the maximum displacement was about 23mm. Also in this case the reduction in the due use of vertical nails was negligible, excepting at the bottom of excavation. The results for 9m height unveil opposite behavior, with greater differences of face horizontal displacements (comparing use and not use of vertical nails) at top and similar displacements from 6.0 m to 9.0 m depth. For 9.0 m and at the top, the difference between use and no use of vertical nails was about 20 mm, not negligible. The maximum value of $\delta h/H$ without vertical nails is equal to 0.005667 for $H = 9.0m$.

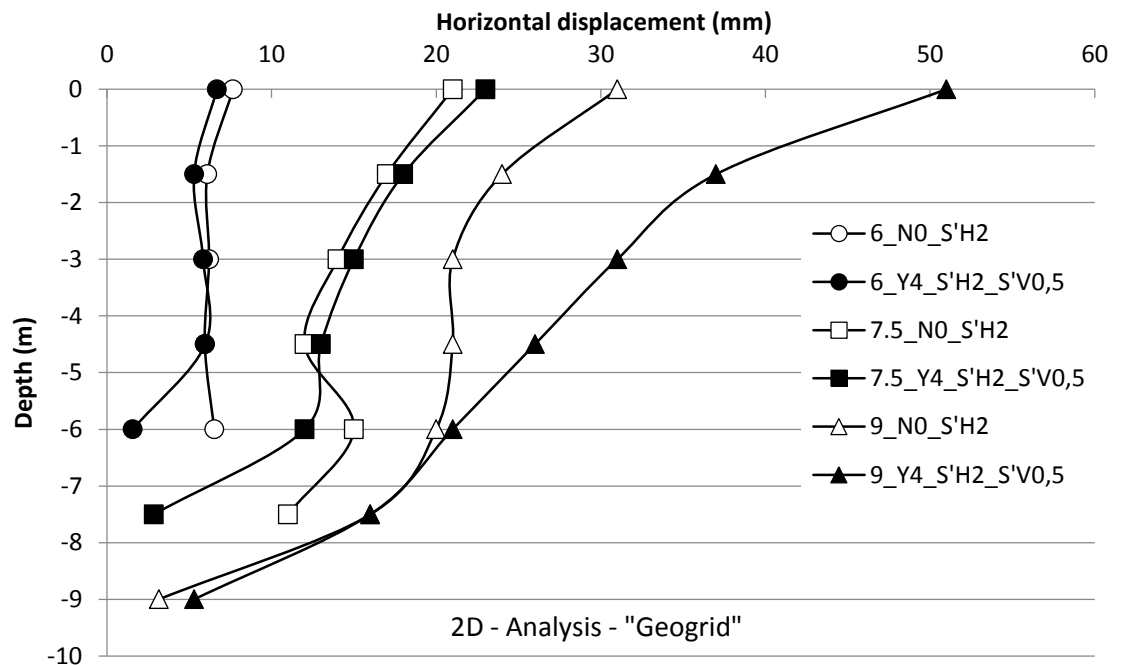


Figure 6 – Horizontal face displacements along depth for excavation height of 6.0m, 7.5m and 9.0m considering 2D analysis and “geogrid” element to represent the nail.

From Figure 6 it is interesting to note that, using “geogrid” to represent the nails, the deformations are bigger when the vertical nails are used. The reason for that can be the fact that this element have no bending stiffness (EI) and can produce a kind of weak zone inside

soil mass. This behavior does not take place in the analysis using “plate” to represent the nail, neither in the 3D analysis. So, the use of element “geogrid” is avoided to evaluate deformations when vertical nails are used.

The Figure 7 presents the same analysis considered in the Figure 6, but in this case the representation of nails was done by means of element “plate”. Using the element “plate” the differences of conditions with vertical nails and without vertical nails are perceptible. Despite of this, the differences, at the top, in absolute values are small for 6.0m and 7.5m height, i.e., 4.4mm and 11mm, respectively. Considering the excavation with 9.0m height the difference, at the top, is more significant and equal to 26 mm for this condition.

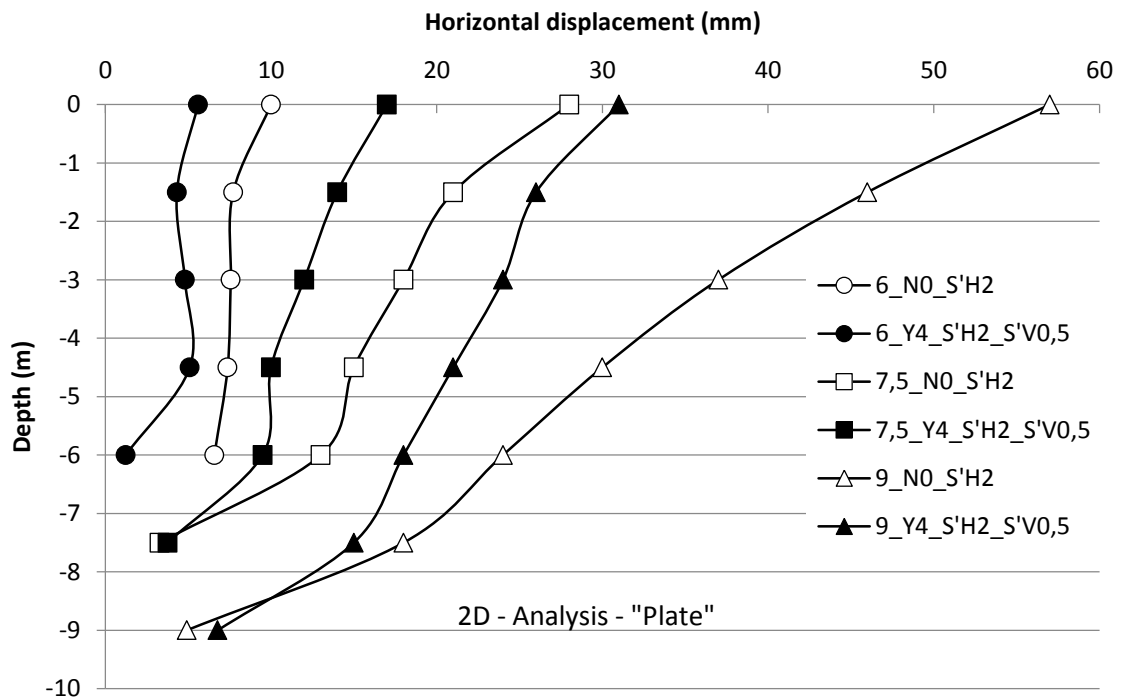


Figure 7 – Horizontal face displacements along depth for excavation height of 6.0m, 7.5m and 9.0m considering 2D analysis and “plate” element to represent the nail.

In the Figure 8 the results using 3D analysis are presented for the same conditions presented in the Figures 6 and 7, i.e., considering or not considering vertical nails for

excavation of 6.0m, 7.5m and 9.0m. In the case of use vertical nails it was considered (in the same way of cases presented in Figures 6 and 7) four lines of vertical nails behind face and horizontal spacing of 0.5m. On the whole, the pattern of results is similar to the presented by Figures 6 and 7. Results of horizontal face displacement are slightly smaller than results presented by Figures 6 and 7, considering heights of 6.0m, 7.5m and 9.0m. Results of 3D analysis exhibit smaller displacements at the bottom of excavation and greater displacements at the top. The differences of displacement at top considering both conditions (with vertical nails and without vertical nails) are equal to 4.5mm (H=6.0m), 11mm (H=7.5m) and 24.5mm (H=9.0m). These differences are better represented when the element “plate” is used to simulate the nails (Figure 7). The maximum value of $\delta h/H$ without vertical nails is equal to 0.006333 for H = 9.0m.

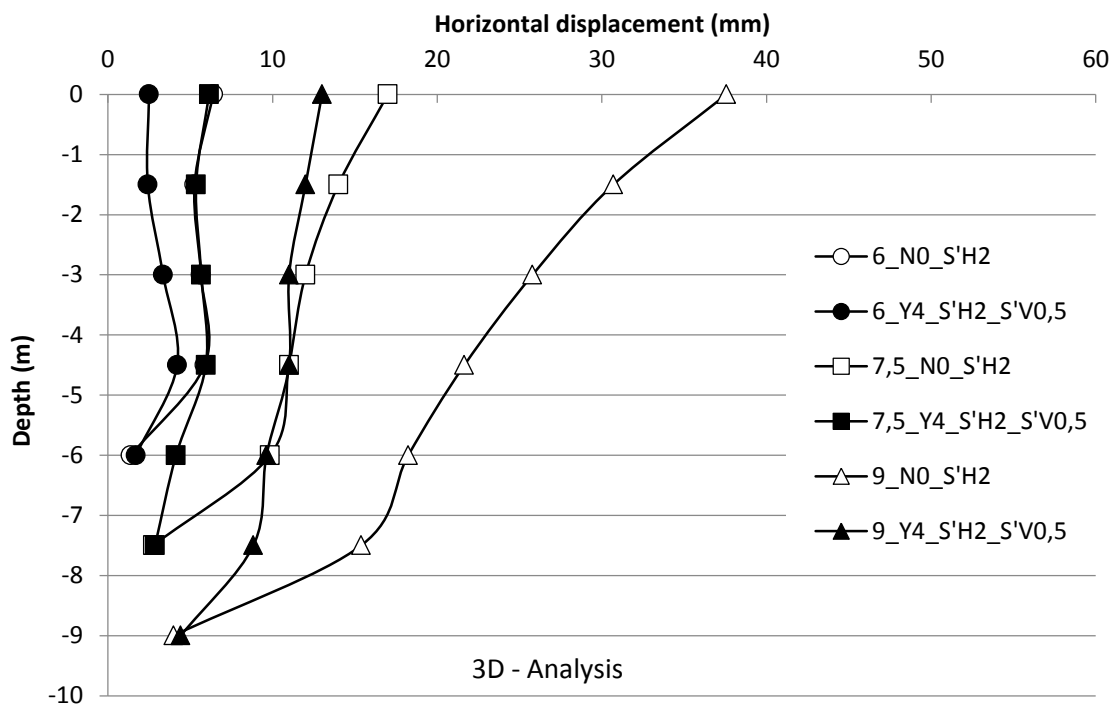


Figure 8 – Horizontal face displacements along depth for excavation height of 6.0m, 7.5m and 9.0m considering 3D analysis.

The results of horizontal face displacements for condition in which low soil-nail relative stiffness is considered is shown in Figure 9. For this condition the value of S_i is equal to 1.905, unlike other analysis that S_i is 3.978 (Table 2). This value of S_i is atypical when elastic modulus of soil is about 10 MPa or 20 MPa (see Figure 4). That is the case of analysis presented in the Figure 9 where $E_s = 12.5$ MPa, $H = 9.0$ m and four lines of vertical nails behind face are used. The purpose of use low value for S_i was to verify if the vertical nails produce a considerable reduction in the horizontal face displacements in this non typical condition.

From Figure 9 it is possible to observe that, for low soil-nail relative stiffness (low S_i), the use of vertical nails can reduce considerably the deformations. The maximum δh is 330mm when vertical nails are not used. Using vertical nails (four lines behind face) spaced horizontally by 2.0m the maximum δh is 142mm and when the horizontal spacing is 0.5m the maximum δh is 55mm. So, the vertical nails have more effectiveness when the S_i is lower than typical values. The maximum value of $\delta h/H$ without vertical nails is equal to 0.004111 for $H = 9.0$ m.

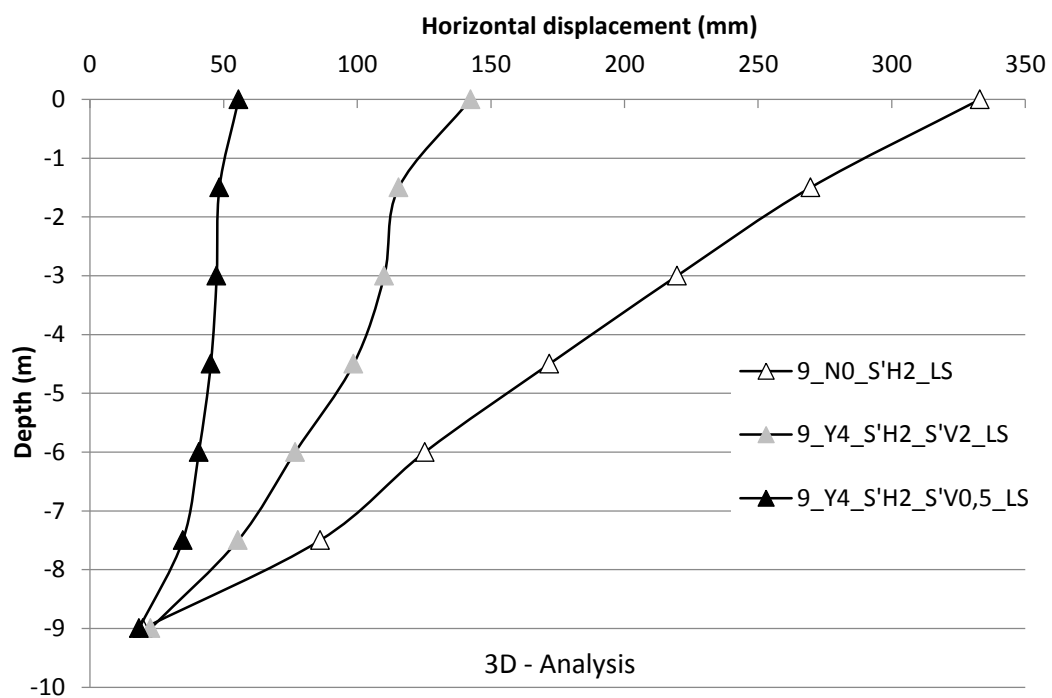


Figure 9 – Horizontal face displacements along depth for excavation height of 9.0m, considering 3D analysis and low stiffness condition (see Table 3).

According to the results of Figures 6, 7, 8 and 9 and considering $H = 9.0\text{m}$ the use of vertical nails can lead to a reduction on horizontal face displacements, mainly when S_i is lower than typical values. Despite of this benefit, it is important to highlight that a great amount of vertical nails are necessary to provide this reduction, i.e., two, three or four vertical nails behind face (Figure 5) and horizontal spacing of vertical nails ($S'V$) equal to 0.50m. For design purpose it is preferable increase the S_i that is based, in this study, only on sub-horizontal nails. The maximum value of $\delta h/H$ without vertical nails is equal to 0.036667 for $H = 9.0\text{m}$, i.e., about ten times greater than results obtained when normal stiffness ($S_i = 3.978$) was considered (Figures 6, 7 and 8).

5.2 – Horizontal face displacement along construction

In this item the horizontal face displacement along construction is presented considering results from analysis 3D, $H=7.5\text{m}$ and five construction stages, each one related to 1.50m of excavation and soil reinforcement. Three conditions were considered: a) without vertical nails (7.5_N0_S'H2), b) with vertical nails with horizontal spacing equal to 2.0m (7.5_Y4_S'H2_S'V2) and c) with vertical nails with horizontal spacing equal to 0.5m (7.5_Y4_S'H2_S'V0.5).

The behavior presented by Figure 10 shows that more significant face horizontal displacements (δh) starts to occur after the 4th stage of excavation and reaches the maximum value at the top and after the 5th (last) stage. At the beginning, 1st and 2nd stages negative displacement takes place at the top. It can be related to the rotation of active zone

in the soil mass. The bigger differences between stages occur after insertion of nail in the 4th stage and after excavation in the 5th stage. Without any vertical nails the maximum displacement is 17mm at top.

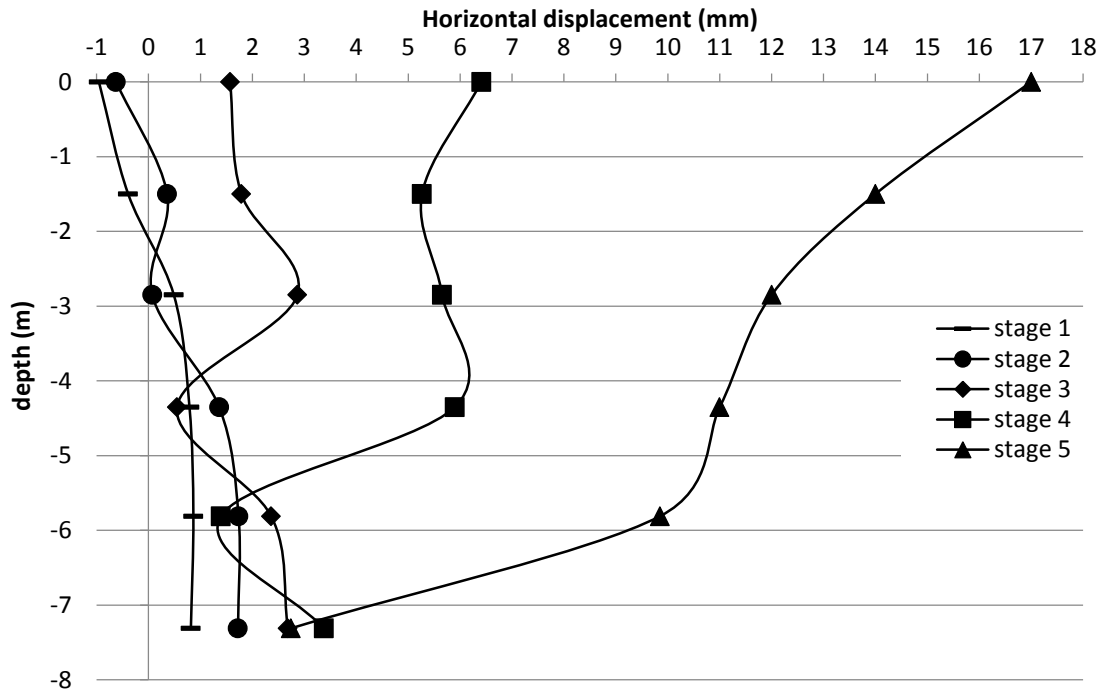


Figure 10 – Horizontal face displacements along construction, $H = 7.5\text{m}$, considering 3D analysis and without vertical nails (7.5_N0_S'H2).

Figure 11 exhibits the results for the same structure shown in Figure 10, but now considering four lines of vertical nails behind face spaced horizontally by 2.0m each one. The pattern observed in Figure 11 is similar to the one presented in the Figure 10, i.e., more significant displacements after excavation of 4th stage and more pronounced difference in deformations between 4th and 5th stages. The use of vertical nails reduced the maximum final face horizontal displacement, at top, in 4.5mm (17mm – 12.5mm). To achieve this benefit the total number of vertical nails used is 80% of total number of sub-horizontal nails used. So, to reduce δh by 4.5mm, practically a double work must be done.

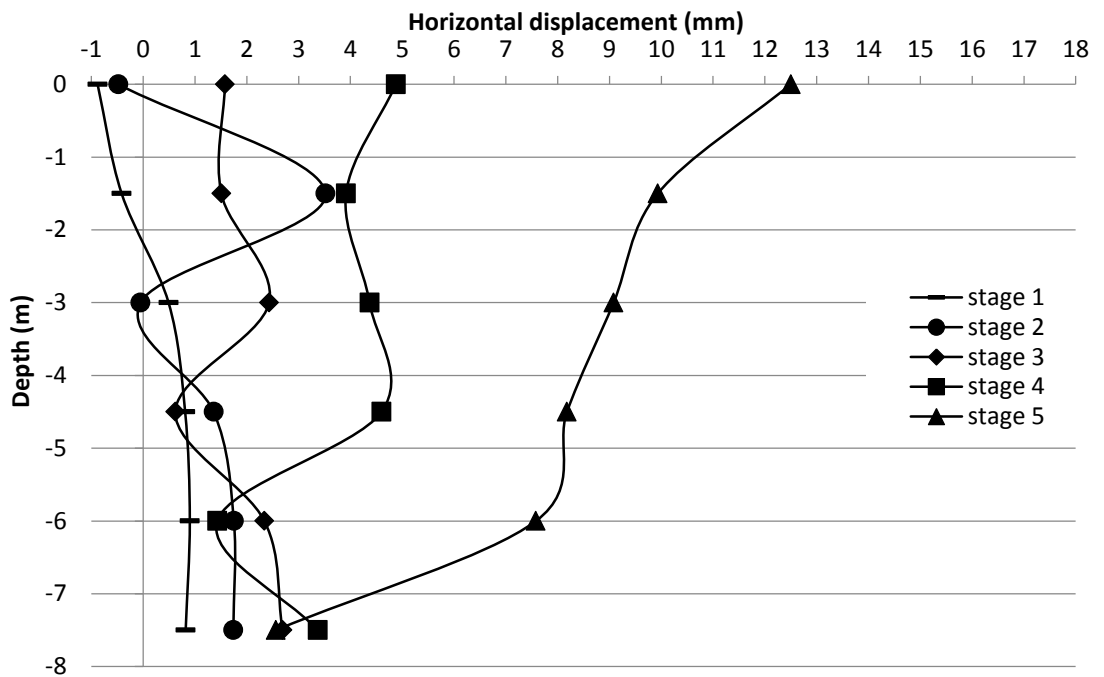


Figure 11 – Horizontal face displacements along construction, $H = 7.5\text{m}$, considering 3D analysis and without vertical nails (7.5_Y4_S'H2_S'V2).

Figure 12 exhibits the results for the same structure showed in Figures 10 and 11, but now considering four lines of vertical nails behind face spaced horizontally by 0.5m each one. The pattern of face horizontal displacements follows the observed in the Figures 10 and 11, but the displacements are smaller in the 4th and 5th stages. Considering this configuration the reduction in maximum horizontal displacement at the top and end of construction, 5th stage, is 11mm (17mm – 6mm), according comparison between results from Figures 10 and 12. To achieve this benefit it is necessary to use a large number of vertical nails, i.e., the total number of vertical nails is 240% of the total number of sub-horizontal nails used. Thus, to reduce δh by 11mm, practically 3.5 works must be done.

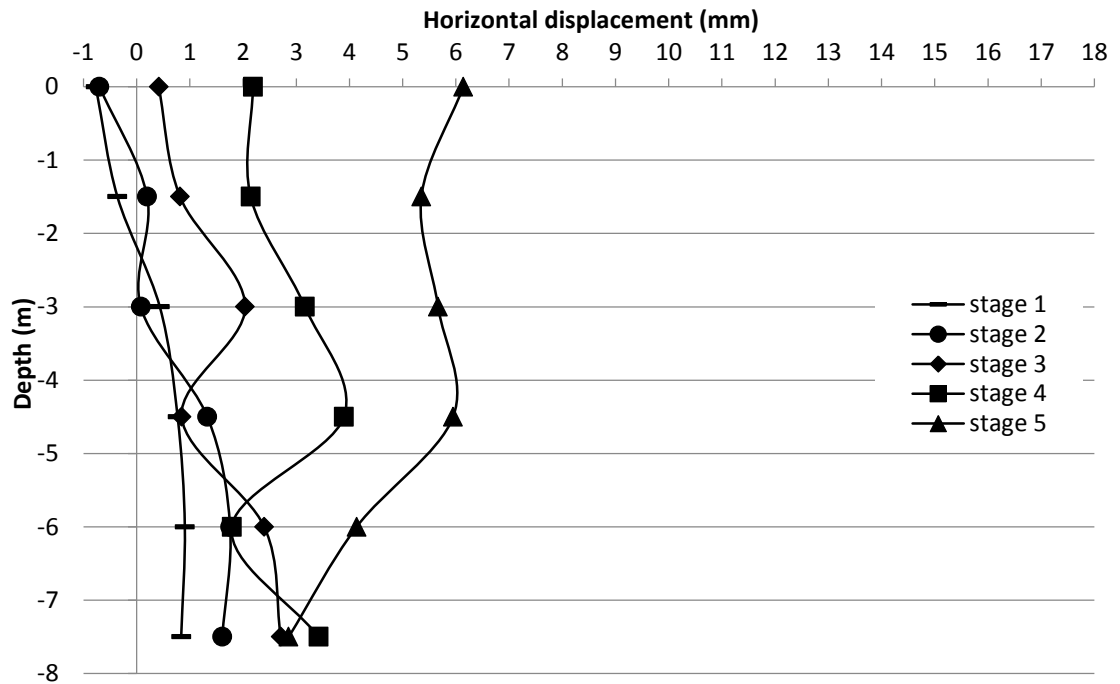


Figure 12 – Horizontal face displacements along construction, $H = 7.5\text{m}$, considering 3D analysis and without vertical nails (7.5_Y4_S'H2_S'V0.5).

Regardless of using or not vertical nails, and at the end of construction, the maximum face horizontal displacement is verified on the top of excavation and the minimum displacement occur ever in the bottom. The larger is the number of vertical nails the smaller is the difference between δh on top and δh at the bottom of excavation.

5.4 – Horizontal displacements distribution

In this section, color shadings of horizontal displacements (U_x) are presented for the structures with 7.5m height, with and without vertical nails (7.5_N0_S'H2; 7.5_Y4_S'H2_S'V2 and 7.5_Y4_S'H2_S'V0.5). These results can be found in the Figure 13 and they were obtained by means of 3D analyses. From this Figure it can be observed that the bigger

horizontal displacements occur in the upper part of excavation when vertical nails are not used (7.5_N0_S'H2, Figure 13a) or when four lines of vertical nails behind face are installed and spaced by 2.0m horizontally (7.5_Y4_S'H2_S'V2, Figure 13b). When the horizontal spacing between vertical nails is reduced from 2.0m to 0.5m the soil mass behind face presents a more homogeneous pattern of displacements without significant changes along depth. Independently of analyses, the U_x displacements have greater magnitude just behind and near face and it occurs along entire depth. So, the face has an importance to local stability preventing little fails between nails. As expected the configuration of nails does not promote any significant change in U_x in the soil foundation. Considering the condition without vertical nails (7.5_N0_S'H2, Figure 13a) the maximum value found for U_x is about 18mm and using four lines behind face 8mm.

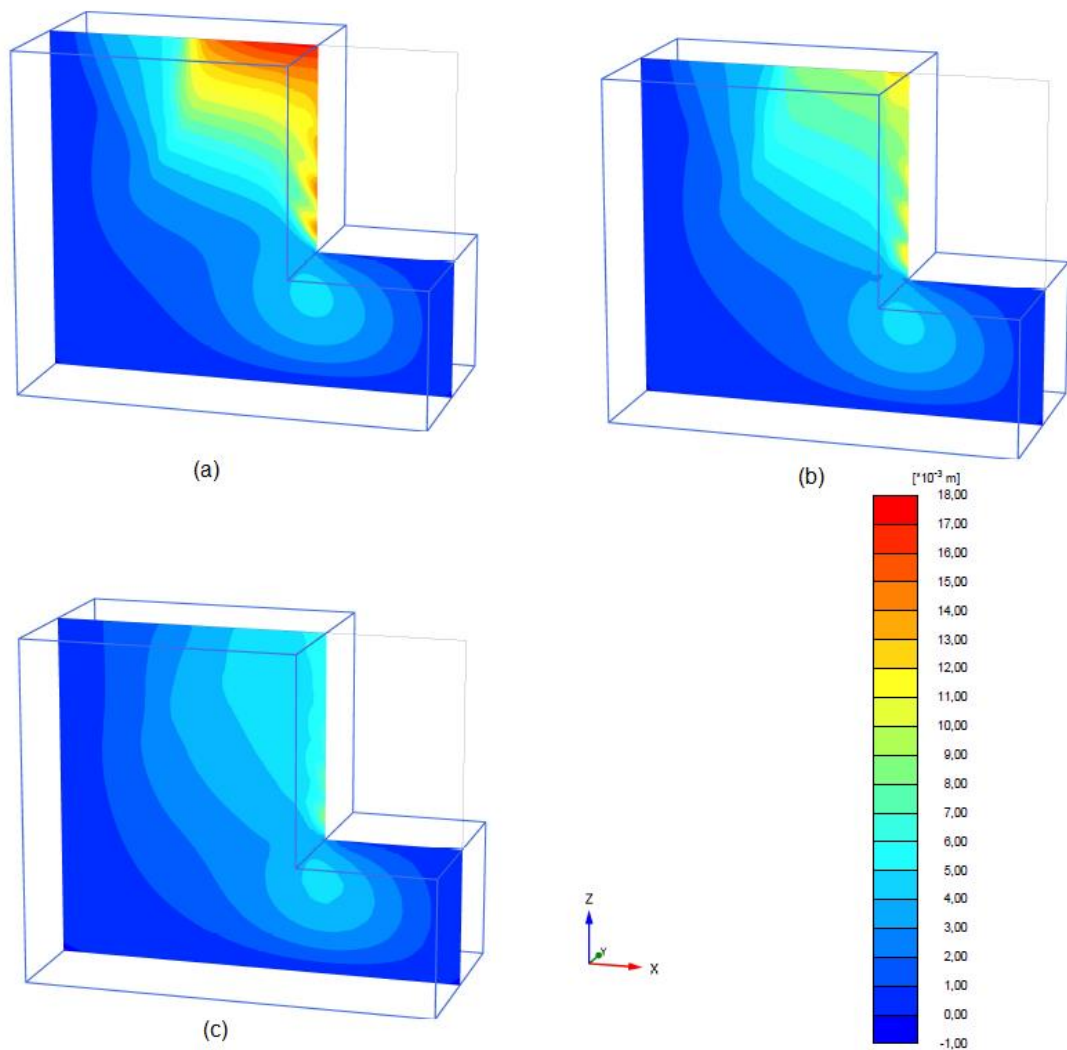


Figure 13 – Horizontal displacements inside reinforced soil mass for structures: a) 7.5_N0_S'H2; b) 7.5_Y4_S'H2_S'V2 and c) 7.5_Y4_S'H2_S'V0.5.

5.2 – Maximum horizontal versus vertical displacement on top face

Maximum horizontal and vertical displacement on top and at the face are presented regarding cases studied and listed in the Tables 1 and 2, but excluding the analysis type LS (with low relative soil-nail stiffness, S_i). The analyses were organized in groups: models without vertical nails, models with 2, 3 and 4 vertical nails behind face spaced at 0.5m horizontally and models with 2, 3 and 4 vertical nails behind face spaced at 2.0m

horizontally. All analyses consider conditions 2D (with “geogrid” and “plate” elements) and 3D and also the heights 6m, 7.5m and 9.0m of excavation.

Figure 14 shows the horizontal versus vertical displacements on top and face (crest) for models with height of 6.0m. The results show that in general the magnitude of horizontal displacement is almost the same as the magnitude of vertical displacement, i.e., $\delta h \approx \delta v$. In all the cases presented the use of vertical nails reduced both horizontal and vertical displacement and the bigger difference is verified in the case of 2D analysis (without vertical nails) using element “plate” when compared with 3D analysis (with vertical nails with four lines behind face and horizontally spaced by 0.5m), i.e., $\Delta\delta h = 4\text{mm}$; $\Delta\delta v = 8\text{mm}$. So, the use of vertical nails does not reduce significantly the displacements and almost does not change the relationship $\delta h/\delta v$ on top face.

In the same way as Figure 14, Figure 15 presents results of δh and δv at top face, but in this case it was considered vertical nails in 2, 3 and 4 lines behind face. In general the values of δh and δv tend to be almost similar when the element “geogrid” in 2D condition is used. When the element “plate” is used the values of δh are slightly bigger than the values of δv . The 3D analysis provides values of δh slightly bigger than δv and the results for 2, 3 or 4 lines of vertical nails behind face are quite similar. The use of vertical nails and the reduction in the horizontal spacing between these ones reduced the values of δh and δv , but the maximum reduction, compared with condition without vertical nails, are $\Delta\delta h = 11\text{mm}$; $\Delta\delta v = 13\text{mm}$, not justifying the use of vertical inclusions for practical purposes.

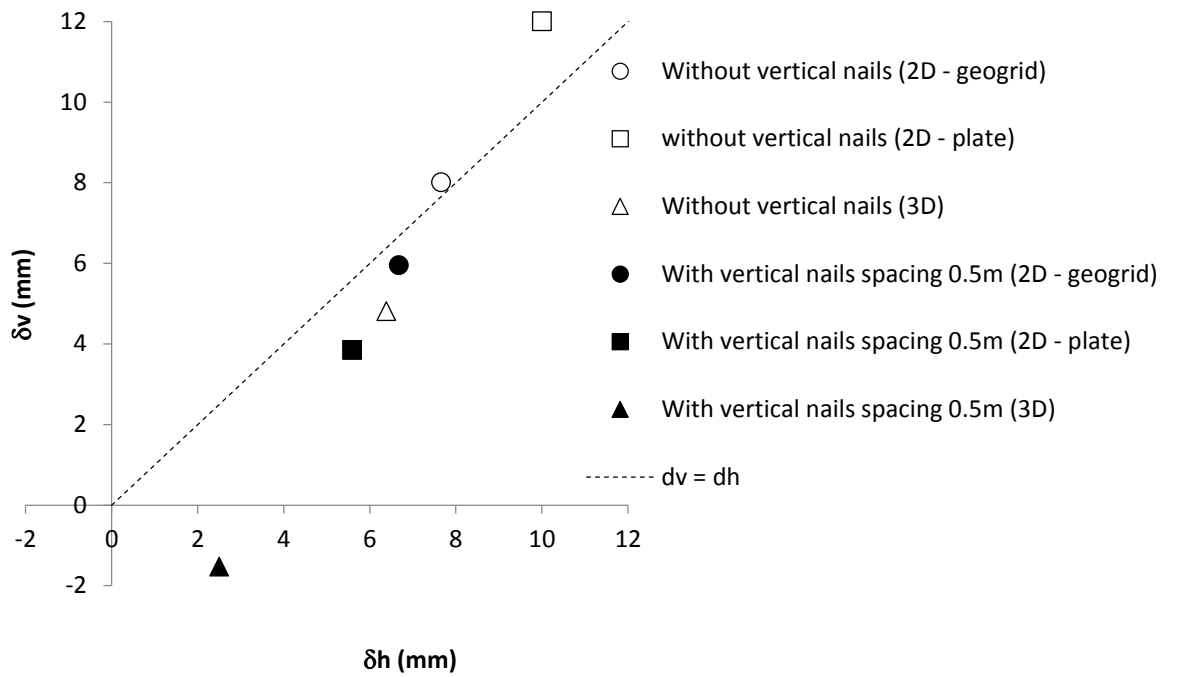


Figure 14 - Maximum horizontal versus vertical displacement, considering height of 6m, 2D (“geogrid” and “plate”) and 3D analyses with (4 lines behind the face) and without vertical nails.

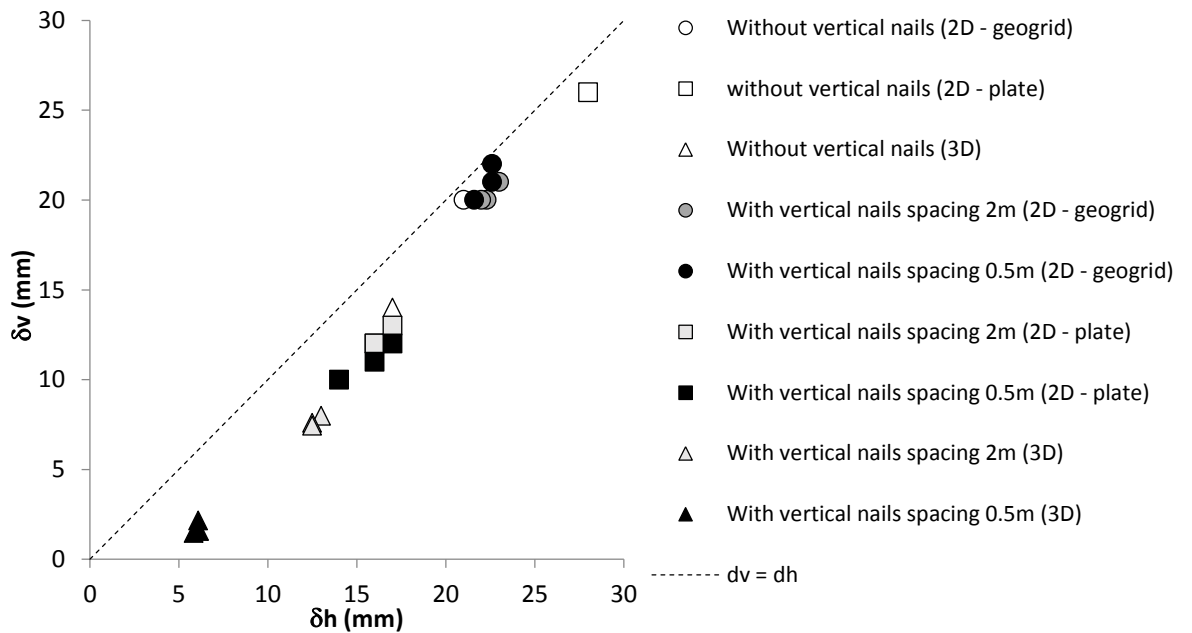


Figure 15 - Maximum horizontal versus vertical displacement, considering height of 7.5m, 2D (“geogrid” and “plate”) and 3D analyses with (2, 3 and 4 lines behind the face) and without vertical nails.

The Figure 16 shows results for 9m height excavation without vertical nails and with vertical nails (4 lines behind face). The tendency is similar to what was observed for H=6m (Figure 14) and H=7.5m (Figure 15), i.e., the increase in the value of δh is followed by an increase in the δv . It is interesting that the use of “geogrid” element provides more deformation when no vertical nail is used. The use of this element leads to different results provided by 2D analysis with “plate” element and 3D analysis. So, the use of “geogrid” element for deformation forecast is not recommended.

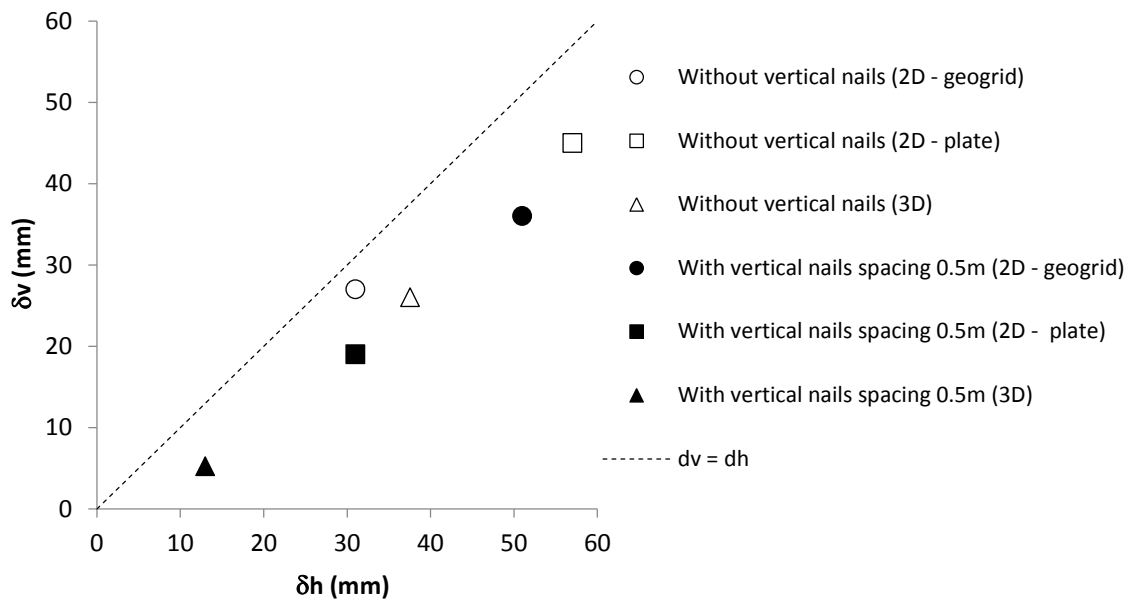


Figure 16 - Maximum horizontal versus vertical displacement, considering height of 9m, 2D (“geogrid” and “plate”) and 3D analyses with (4 lines behind the face) and without vertical nails.

Considering results presented in Figures 14, 15 and 16 and the three heights analyzed (6m, 7.5m and 9m) the results, in general, are in agreement with the reported in Clouterre (1991) with regard to the relationship $\delta h/\delta v$. According to Clouterre (1991), based on instrumented soil nailing retaining structures, without vertical nails, the relationship $\delta h/\delta v$ has a value near the unity in some instrumented works. The result can be extended for condition with vertical nails that do not promote significant change in this behavior.

5.5 – Assessment of safety factor (2D plate, 2D geogrid, 3D)

The influence of vertical nails and the kind of modelling (2D, using “geogrid” or “plate” element or 3D) are discussed in this item. Factors of safety were determined considering values of H equal to 6m, 7.5m and 9m and these results are presented in the Figures 17, 18 and 19, respectively.

According to the Figure 17 (H = 6m) the safety factor (SF) does not suffer significant variation due to the use of different approaches of modelling. Also, the use of vertical inclusion (4 lines behind face and spaced by 0.5m) is not effective to improve the safety factor, despite of little increase that had occurred in the case of 3D analysis.

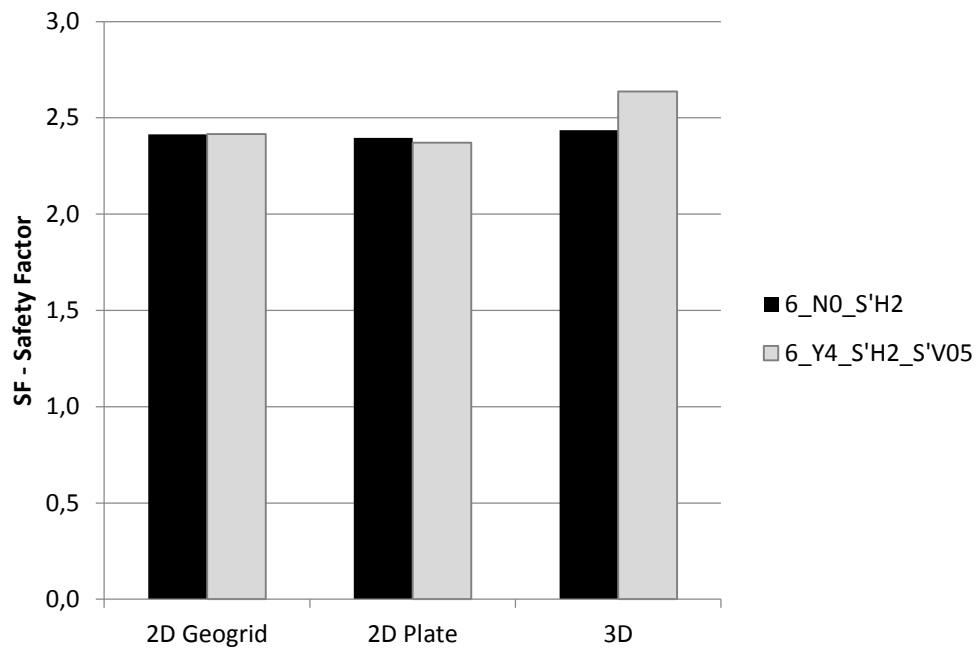


Figure 17 – Safety factor for excavation with $H = 6\text{m}$, determined by analyses 2D (“geogrid” and “plate”) and 3D, without vertical nails and with 4 lines of vertical nails behind face.

The Figure 18 presents results of SF for excavation with $H = 7.5\text{m}$, but also consider the horizontal spacing of vertical inclusion equal to 2.0m . The results are similar to the presented for case where $H = 6\text{m}$ (Figure 17) with similar SF for all analysis, but with a little difference in the case of 3D analysis. According to the 3D analysis the use of 4 vertical inclusions behind face and spaced by 0.5m provides a slight increase in the safety factor (2.10 to 2.35), but this benefit is really small compared with the amount (great density) of vertical inclusion necessary to install to reach this increase. Therefore, the use of vertical inclusions is not effective to increase the SF.

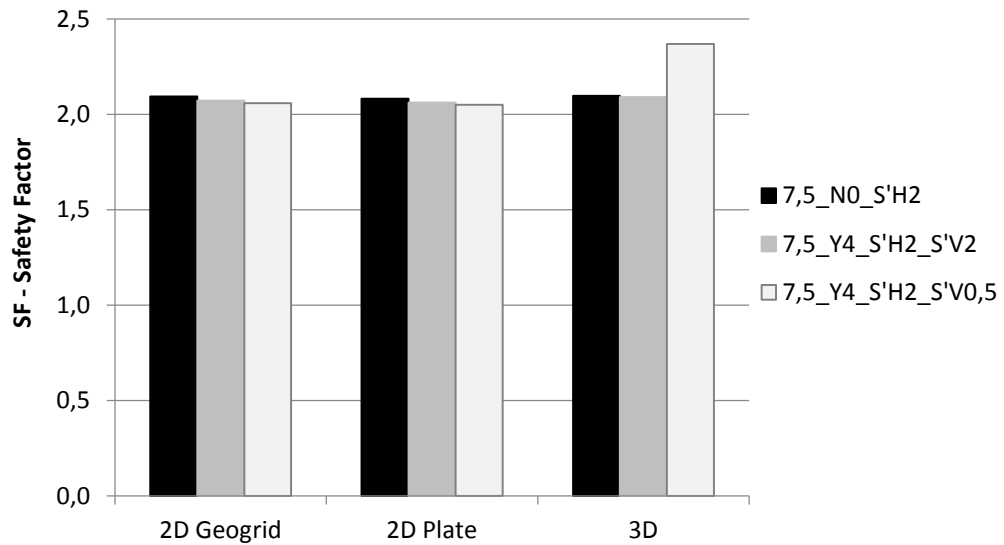


Figure 18 – Safety factor for excavation with $H = 7.5\text{m}$, determined by analyses 2D (“geogrid” and “plate”) and 3D, without vertical nails and with 4 lines of vertical nails behind face spaced horizontally by 2.0m and 0.5m.

Figure 19 presents results for SF, but considering $H = 9\text{m}$ and the condition where the value of S_i is low ($S_i = 1.905$) and unusual, according to the Figure 4. For analysis with low S_i the code LS is used (see Table 2) to distinguish from other analysis with ordinary values of S_i (see Figure 4). The analysis showed that the higher height the higher influence of vertical inclusions, comparing with results from Figures 17 and 18. The analysis with “geogrid” element returns an unexpected behavior, with smaller safety factor even using vertical inclusions. Therefore, the use of element “geogrid” is unadvisable for this determination instead of use of 2D “Plate” and 3D analyses that have exhibited coherent values. The influence of vertical inclusions is greater in the 3D analysis and in both cases: with low S_i ($=1.905$) and ordinary S_i ($= 3.978$), but the ΔSF was almost the same. According to the analysis 3D, the use of vertical inclusions was capable to increase of safety factor. However

is more economic increase the number of sub-horizontal nails or increase de Si to achieve this result (improve safety factor).

Regarding the determination of safety factor the results showed that the approaches using 2D “Plate” and 3D analysis are more appropriated for determination of SF.

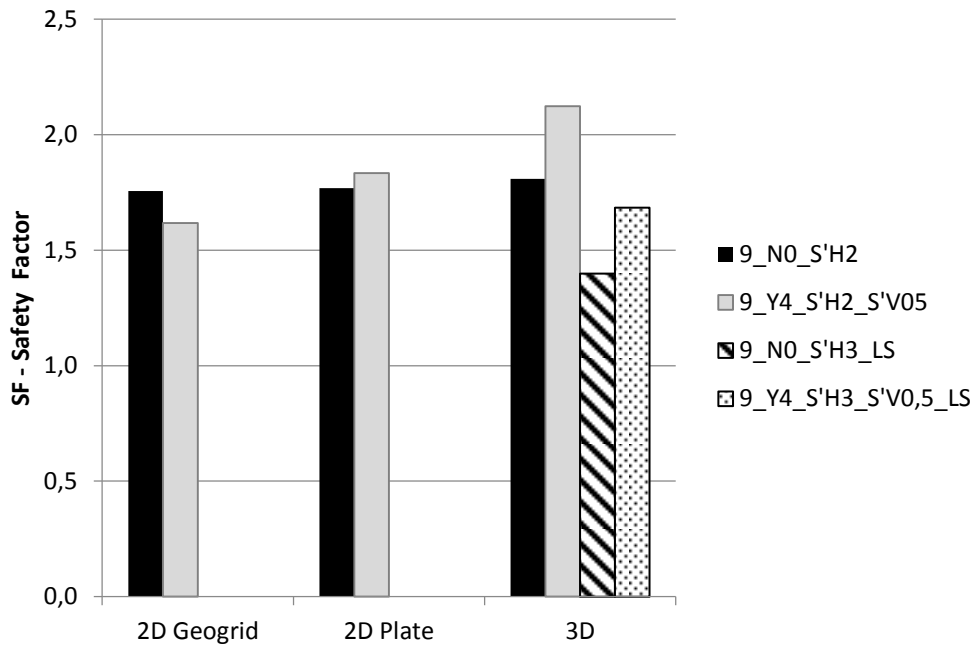


Figure 19 – Safety factor for excavation with H = 9m, determined by analyses 2D (“geogrid” and “plate”) and 3D, without vertical nails and with 4 lines of vertical nails behind face spaced horizontally by 0.5m.

5.6 – Assessment of summation of maximum tension on sub-horizontal nails

Assessment of influence caused by the use of vertical nails in the summation of maximum axial tension in all the sub-horizontal nails (5 nails) is done in this section. The objective is to

verify if the vertical inclusions are able to reduce the tension in the sub-horizontal nails, providing economy. The study was done considering ordinary Si and low Si.

5.6.1 – Summation of maximum tension on nails (ordinary stiffness)

According to the Figure 20 the use of element “geogrid” in the 2D analysis has conducted to results different from analysis 2D using element “plate” and 3D analysis. Using element “geogrid” the higher the number of vertical inclusions the higher is the summation of axial tension in the sub-horizontal nails. This behavior is the opposite of that found in the other two kind of modelling (2D “plate” and 3D). So, the use of element “geogrid” is not advisable to determination of axial tension on the sub-horizontal nails. Considering the 2D “plate” and 3D analysis the results have shown that the use of vertical inclusions reduced the axial tension until a certain amount of vertical nails (until 2.0m of horizontal spacing), but increasing more the number of vertical inclusions no effect in reduction of axial tension takes place. Despite of the observed reduction (about 15%) in the summation of maximum axial tension, even without vertical nails the summation of maximum tension is quite far away from the maximum summation supported by five sub-horizontal nails, that is 2500 kN (see Table 4. Thus, the reduction does not justify the use of vertical inclusions in the practice.

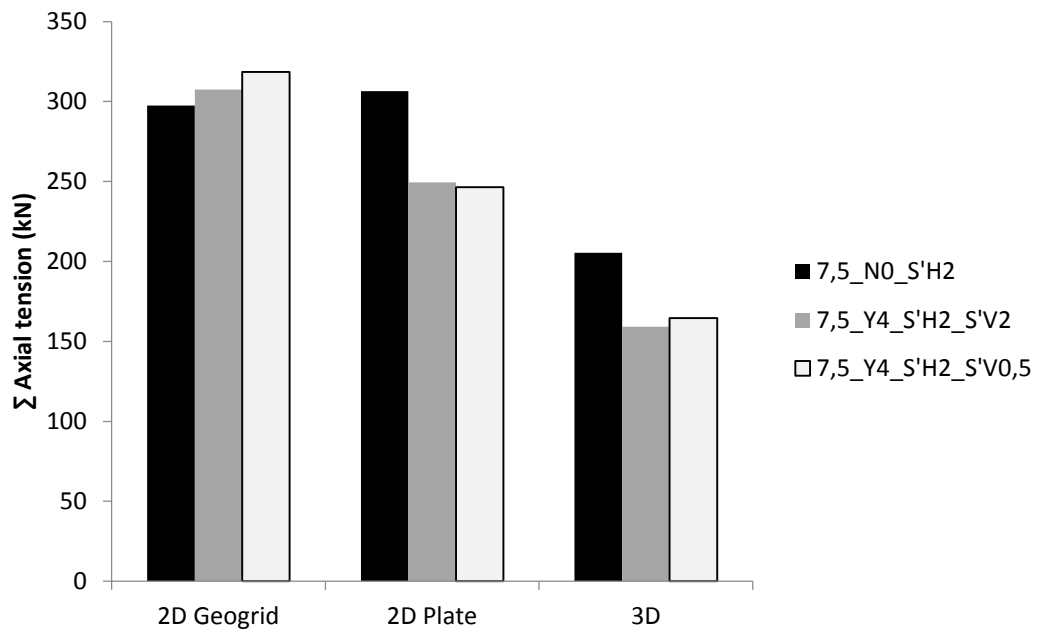


Figure 20 – Summation of maximum axial tension acting in the sub-horizontal nails, $H = 7.5\text{m}$.

5.6.2 – Summation of maximum tension on nails, ordinary and low S_i

Through inspection of Figure 21 it is possible to observe that the use of element “geogrid” in the 2D analysis conducted to inconsistent results, different from what was observed in the 2D analysis with “plate” element and 3D analysis. The 2D analysis with “plate” element and 3D analysis show that the use of vertical nails reduce the axial tension in the sub-horizontal nails, but the reduction is not expressive and to reach this result it is necessary the use of great amount of vertical nails. The effect of reduction in the axial tension is more pronounced when the value of S_i is low.

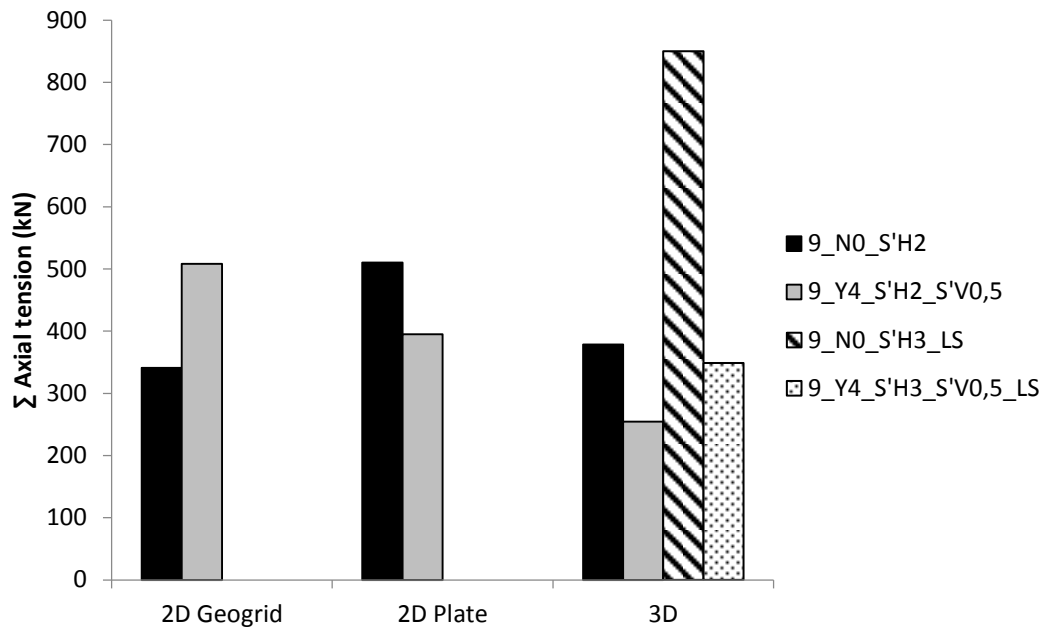


Figure 21 – Summation of maximum axial tension acting in the sub-horizontal nails, $H = 9\text{m}$, considering ordinary S_i and low S_i (LS).

6 – Conclusions

This paper presented results of computational modelling performed to analyze the behavior of soil nail retaining structures. It was verified the influence of the use of vertical nails in the mechanical behavior of the structures in terms of horizontal displacements, horizontal face displacements, axial tension in sub-horizontal nails and safety factor against failure. The analyses were carried out by means 2D PLAXIS software (two kinds of analysis, one using “geogrid” element and another one using “plate” element to represent the nails) and 3D PLAXIS software. The main conclusions are presented as follows:

- Regarding the modeling it was verified that the 2D approach can be used to represent the real three dimensional situation, but the use of element “plate” is more suitable because the

use of element “geogrid” provided some differences compared with 2D analysis using “plate” and 3D analysis. These differences are more pronounced in terms of horizontal face displacements and summation of axial tension acting in the sub-horizontal nails. So, to represent a real three dimensional by means of 2D analysis it is recommended to use the element “plate” to represent the nails.

- In terms of horizontal (δh) and vertical (δv) face displacement at top (crest) of excavation the general behavior observed from 36 numerical analyses carried out is that the δh tends to be almost equal to δv in most cases. This behavior is reported in some instrumented soil nailing structures (Clouterre, 1991).
- The use of vertical nails was not effective in reducing the horizontal face displacements even if four lines, spaced by 0.5m horizontally, of vertical nails are used. There is effectiveness of vertical nails to reduce the horizontal displacements only when the retaining system presents low soil-nail relative stiffness ($S_i \approx 1.9$, for example), but this condition (low S_i , instead of ordinary S_i) is not found often in the practice.
- The determination of the safety factor can be done through 2D or 3D approaches and in the case of 2D approach it is recommended to represent the nails using the element “plate”. The values obtained by means of 2D analyses show that the use of vertical nails does not promote any significant variation in the safety factor. The results provided by 3D analyses show a slight increase in the safety factor, but only when four lines of vertical nails behind face, spaced by 0.5m, are used.

- For evaluation of axial tension on nails the use of 2D analysis using “geogrid” element is not recommended. The use of vertical nails can reduce the axial tension in the sub-horizontal nails and this effect is more pronounced when the value of S_i is low (not usual range). To produce reduction in the axial tension of the sub-horizontal nails a great amount of vertical nails must be used.

Acknowledgments

The authors would like to thank the FAPEMIG, Estate of Minas Gerais (Brazil) research council and the CNPq, Brazilian research council, for the financial support provided for this research.

References

- Abramento, M, Zirlis, A, C., Ehrlich, M. A, 2016, “Reforço do terreno”. In: Falconi, Frederico et al. “Fundações Teoria e prática”. 3^a. ed. São Paulo: 2016. cap. 16, p. 641-684 (in Portuguese).
- Bonab, M. H., Razavi S. K., 2016, A study of soil-nailed wall behaviour at limit states, Ground improvement, ICE, v. 169 p. 64-76.
- 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, v. 32, p. 290-303.
- Ehrlich, M., Silva, R. C., 2015, Behavior of a 31mhigh excavation supported by anchoring and nailing in residual soil of gneiss, Engineering Geology, v. 1991, p. 48-60.
- Fan, C. C., Luo, J. H., 2007, Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes. Computers and Geotechnics, v. 35, p. 585-599.

- Gurpersaud; N., Vanapalli, S. K., M. ASCE 2; Sivathayalan, S., 2017, Semiempirical Method for Estimation of Pullout Capacity of Grouted Soil Nails in Saturated and Unsaturated Soil Environments, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 139(11), p. 1934-1943.
- Kim Y., Lee S., Jeong S., Kim J., 2013, The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil Slopes *Computers and Geotechnics*, v. 49, p 253-263.
- Mickovski, S. B., Lindsay F. M., Smith, M. J., 2016, Construction and testing of self-drilled soil nails. *Geotechnical Engineering*, v.169, p. 541-553.
- Moniuddin, M. K., Manjularani, P., Govindaraju, L., 2016, Seismic analysis of soil nail performance in deep excavation, *International Journal of Geo-engineering*, Springer, 10 p.
- Rawat, S., Gupta, A. K., 2016, Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods, *International Journal of Geosynthetic sand Ground Engineering*, Springer, Switzerland, v. 34, 23 p.
- Seo, H.; Jeong; K., Choi, H., Lee, I., 2012, Pullout Resistance Increase of Soil Nailing Induced by Pressurized Grouting. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 138(5), p. 604-613.
- SILVA, F. M., 2015, "Monitoração de uma escavação grampeada com face rígida realizada em aterro rodoviário", M Sc Dissertation, COPPE, Federal Univ. of Rio de Janeiro.
- Tan S. A.; Ooi; P. H., Park, T. S.; Cheang W. L., 2008, Rapid Pullout Test of Soil Nail. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(9), p 1327-1338.
- Tokhi. H., Ren, G., Li, J., 2016, Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand. *Computers and Geotechnics*, v. 78, p 144-154.
- Turner, J. P., Jensen, W. G., 2005, Landslide Stabilization Using Soil Nail and Mechanically Stabilized Earth Walls: Case Study. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(2), p. 141-150.
- Villalobos, F. A., Villalobos, S. A., Oróstegui, P. L., 2018, Observations from a parametric study of the seismic design of soil nailing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 171(2), p. 112-122.

Wei, W. B., Cheng Y. M., 2010, Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods. *Computers and Geotechnics*, v. 37, p. 602-618.

Ye, X., Wang, Q., Wang, S., Sloan, S., Sheng, D., 2018, Performance of a compaction-grouted soil nail in laboratory tests, *Acta Geotechnica*, Springer, Switzerland 15 p.

Yin, J. H., SU, L. J., Cheung, R. W. M., Shiu, Y. K., Tangs, C., 2009, The influence of grouting pressure on the pullout resistance of soil nails in compacted completely decomposed granite fill. *Geotechnique*,. 59(2), p 103-113.

Zhang, G., Cao, J., Wang L., 2013, Centrifuge model tests of deformation and failure of nailing-reinforced slope under vertical surface loading conditions. *Soils and Foundations*, 53(1), p. 117-129.

Zhou Y. W., Cheuk C. Y., Tham L. G., 2009, An embedded bond-slip model for finite element modelling of soil–nail interaction, *Computers and Geotechnics*, v. 36, p. 1090-1097.