

## **4. Modelagem de escavações com grampos e tirantes**

Estudos de deformabilidade em taludes em solo grampeado serão realizados através de modelagem computacional utilizando o programa FLAC. Os resultados fornecidos pelo programa (valores de deslocamento, tensões iniciais, esforços axiais nos grampos, etc.) são afetados diretamente pelos dados de entrada, tais como, geometria da malha, condições de contorno, iterações para a consolidação da malha, modelo constitutivo utilizado, parâmetros do solo e do grampo, entre outros.

Inicialmente, procurou-se compreender a influência da variação de alguns parâmetros importantes na modelagem de um problema físico. Os estudos realizados neste capítulo demonstraram a grande importância da escolha adequada destes parâmetros, pois uma pequena variação dos mesmos pode causar mudanças expressivas nos resultados.

### **4.1. Aplicação das tensões “in situ”**

Na modelagem de um problema físico pelo FLAC, há vários indicadores no programa que determinam se a malha está ou não consolidada; isto é, se as tensões “in situ” foram aplicadas e a condição de equilíbrio atingida. A melhor maneira de buscar esta indicação é acompanhar os vetores de velocidade (“xvel, yvel”) à medida que o número de iterações (“steps”) aumenta. A malha será considerada consolidada quando os valores dos vetores se estabilizarem em valores próximos ou iguais a zero, caracterizando-se assim, o equilíbrio estático.

Para avaliar o número de iterações necessárias para caracterizar a condição de equilíbrio, foram feitas simulações limitando-se o número máximo de iterações. Para este estudo, foi utilizada a geometria mostrada na Figura 60. Os vetores de velocidade foram monitorados nos pontos A, B e C, também indicados na Figura 60.

Os resultados, mostrados nas Figuras 61 e 62, indicam que o equilíbrio pode ser considerado para um número mínimo de iterações igual a 400. Para este valor, os vetores de velocidade são aproximadamente nulos.

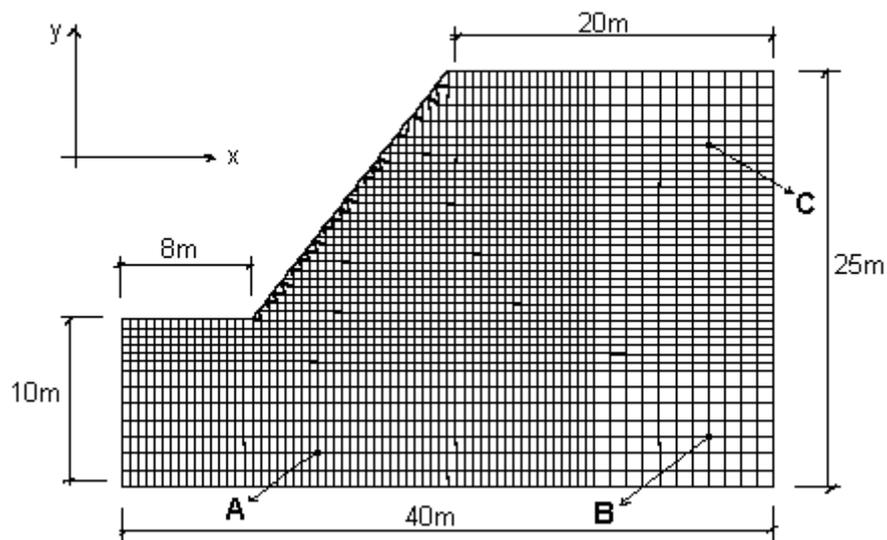


Figura 60 - Geometria adotada nas análises preliminares

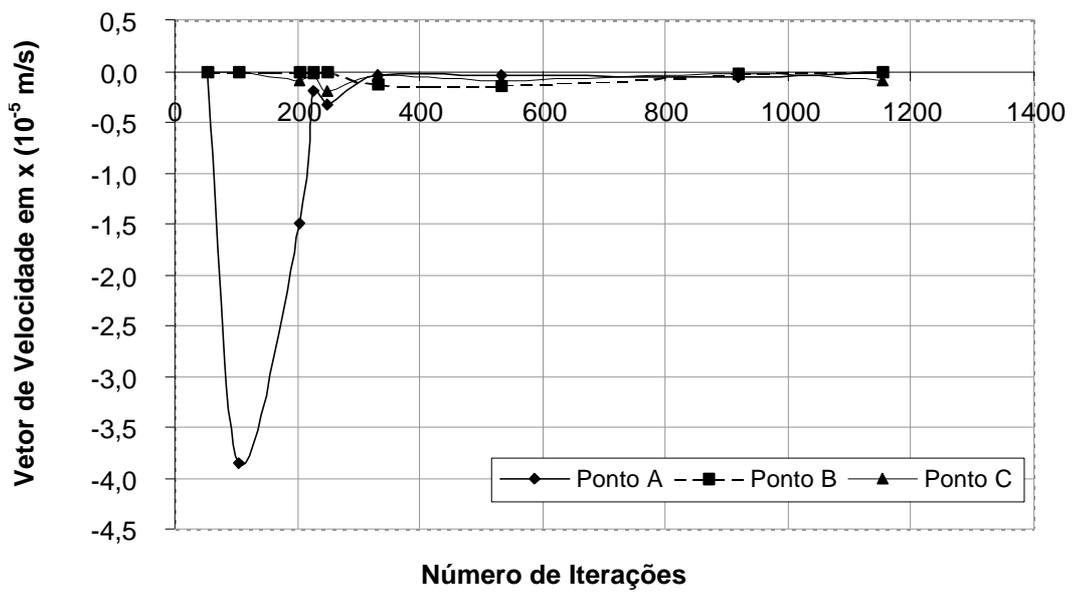


Figura 61 - Variação das tensões "in situ" (vetores de velocidade em x) em função do número de iterações

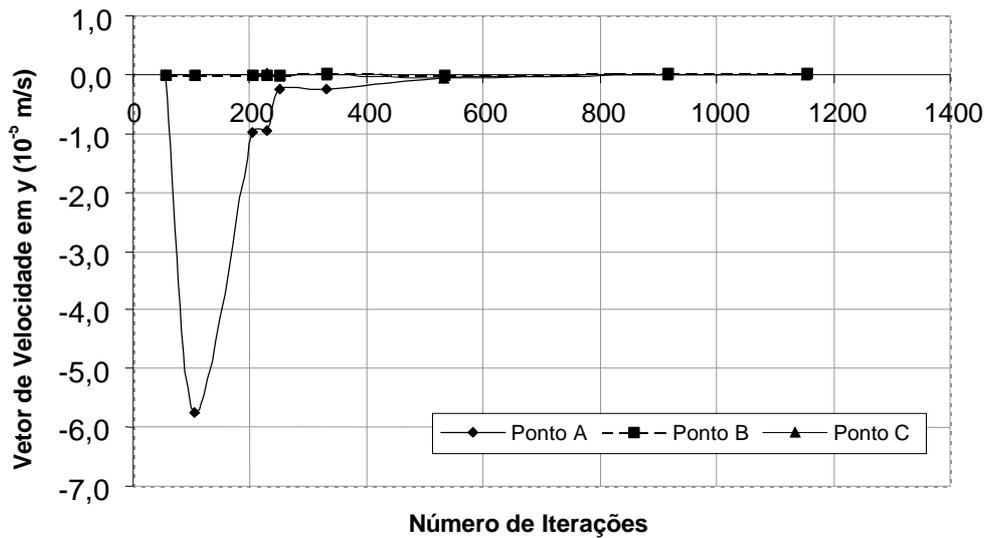


Figura 62 - Variação das tensões “in situ” (vetores de velocidade em y) em função do número de iterações

#### 4.2. Influência dos parâmetros geométricos

A utilização de programas computacionais baseados no método das diferenças finitas (MDF), método dos elementos de contorno (MEC) e método dos elementos finitos (MEF) está cada vez mais presente, como ferramenta de auxílio em projetos de engenharia civil. Porém deve-se enfatizar, que estes programas devem ser usados de forma cautelosa pois, em muitos casos, se o problema físico não for representado corretamente os resultados finais obtidos poderão estar incorretos e , em algumas situações, incompatíveis com o projeto em questão.

A representação correta do modelo físico muitas vezes esbarra na dificuldade da obtenção de valores representativos do modelo, como por exemplo, módulo de deformabilidade do solo, tensões iniciais “in situ”, condição de saturação, condições de contorno, valores de resistência ao arrancamento de elementos de reforço (grampo, tirante, etc.). Outros problemas não menos importantes são: compatibilidade entre parâmetros de campo e de laboratório, efeito de escala, hipóteses simplificadoras utilizadas pelos programas, modelagem bidimensional adotada em problemas 3D, modelo constitutivo empregado, efeito do tempo na análise dos resultados (“creep” ou fluência), entre outros.

Assim sendo, para o sucesso da análise em questão, torna-se necessário o completo entendimento do programa computacional e do modelo físico no que diz respeito aos parâmetros do solo, geometria, condições de contorno, carregamentos, parâmetros geomecânicos dos elementos de reforço e metodologia construtiva.

A avaliação da influência da inclinação do talude ( $\beta$ ), do número de etapas de escavação, das condições de contorno, da modelagem da parede e dos elementos de reforço, nos deslocamentos e esforços axiais nos grampos foi o objetivo deste estudo, dando continuidade a estudos paramétricos realizados por Springer (2001).

Posteriormente, estudos complementares do comportamento tensão-deformação de estruturas grampeadas foram realizados em taludes em solo residual.

#### 4.2.1. Inclinação do talude (b)

A geometria adotada neste estudo consistiu em uma malha retangular constituída de 138 elementos horizontais e 84 elementos verticais. São apresentados três tipos distintos de discretização com elementos de 1,00m na horizontal por 0,25m na vertical, seguidos de elementos de 0,50m por 0,25m e 0,25m por 0,25m, conforme mostra a Figura 63. Os limites entre as fronteiras são de 52,50m na horizontal e de 21,00m na vertical.

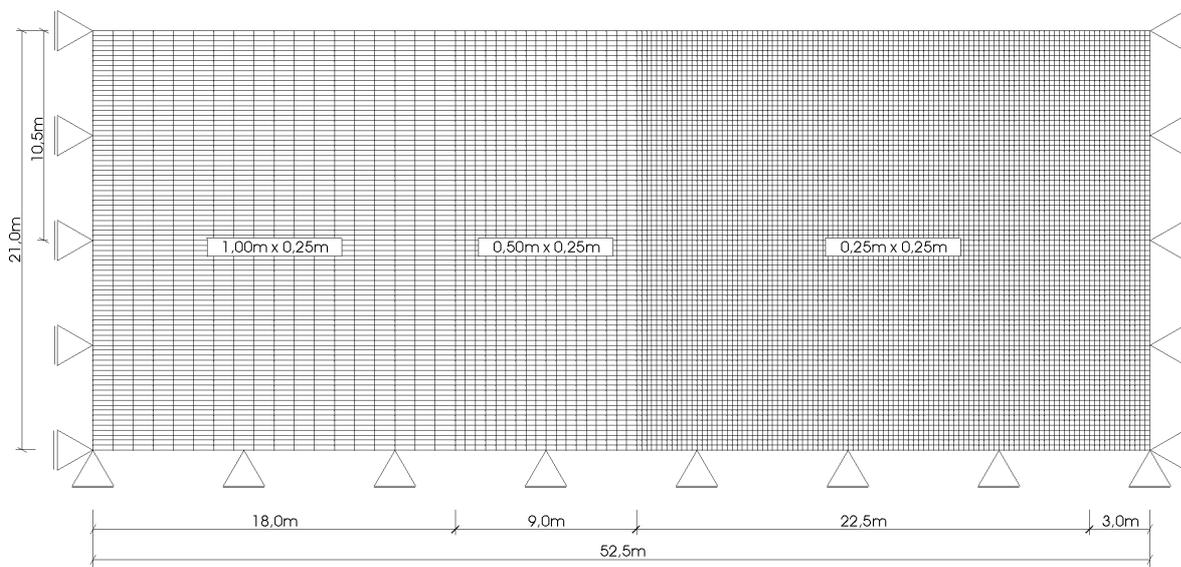


Figura 63 - Geometria utilizada na fase de consolidação da malha

Após a consolidação da malha (aplicação de forças gravitacionais nos elementos), mudam-se às condições de contorno e dá-se início ao procedimento de escavação. O processo de escavação (eliminação de elementos da malha) foi simulado em 7 fases sucessivas com incrementos de 1,50m. O espaçamento horizontal ( $S_h$ ) e vertical ( $S_v$ ), entre grampos, foi de 1,50m. A altura total de escavação ( $H$ ) foi de 10,5m. A base da escavação (pé do talude) possui 3,0m de comprimento (Figura 64).

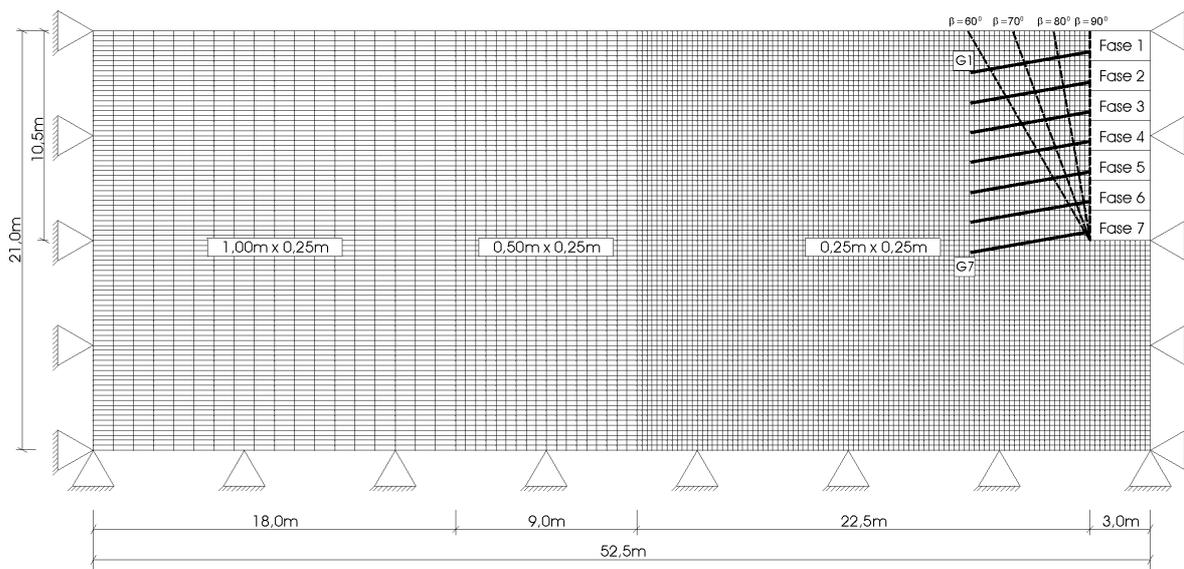


Figura 64 - Geometria utilizada durante a fase de escavação

O modelo constitutivo selecionado para representar o solo foi o modelo elástico perfeitamente plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A simulação dos grampos (tipo livre) foi feita por elementos unidimensionais, que trabalham por tração, não apresentando resistência à flexão. A resistência no contato solo-grampo foi computada em função das componentes de adesão e de atrito nesta interface (“cable element”). A parede foi representada por elementos de viga, que apresentam resistência à flexão. Os parâmetros geomecânicos empregados em todas as análises estão explícitos na Tabela 24.

Foram elaborados 4 casos, nos quais o único parâmetro considerado variável foi a inclinação do talude ( $\beta$ ). Quatro inclinações foram estudadas ( $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  e  $90^\circ$ ) com a mesma disposição final dos grampos, correspondendo à última fase de escavação ( $L/H=0,57$ ), conforme ilustra a Figura 65. Todos os grampos possuem comprimento ( $L$ ) de 6,0m.

Tabela 24 - Propriedades geomecânicas.

Grampo				Parede		Solo						
$\sigma_{aço}$	$E_{aço}$	$G_{injeção}$	$q_s$	$E_{parede}$	$h_{parede}$	$E_{solo}$	$\nu$	$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$\psi$	$k_0$
MPa	GPa	GPa	kPa	GPa	cm	MPa		KN/m <sup>3</sup>	kPa	graus	graus	
500	205	9,0	150	24	10	45	0,25	18,5	10	32	7,5	0,5

$\sigma_{aço}$ =tensão de escoamento do aço,  $E$ =módulo de Young,  $G$ =módulo cisalhante,  $q_s$ =resistência ao arrancamento do grampo,  $h_{parede}$ =espessura da parede,  $\nu$ =coeficiente de Poisson,  $\gamma$ =peso específico natural,  $c'$ =coesão efetiva,  $\phi'$ =ângulo de atrito,  $\psi$ =ângulo de dilatação,  $k_0$ =coeficiente de empuxo no repouso.

A simulação da inclinação do talude deve ser feita através do comando “gen line”, inserido no bloco 05 (Tabela 22), e da eliminação de alguns elementos da malha, através do comando “mod null”.

O programa FLAC apresenta uma limitação no que se diz respeito a mudanças na geometria a ser estudada. Uma vez gerados arquivos de saída “.sav”, não são permitidas alterações na geometria do talude.

Fatores de segurança globais foram calculados, com o auxílio do programa “STABL for Windows” (Purdue University, 2000), pelo método de Bishop Simplificado, admitindo-se superfícies de ruptura circulares. O objetivo destes cálculos de estabilidade por equilíbrio limite foi o de complementar o entendimento do comportamento tensão-deformação/resistência dos taludes. Os resultados, mostrados na Tabela 25, indicam a necessidade da adoção de um sistema de estabilização, independente da inclinação  $\beta$ , pois em todos os casos obteve-se  $FS_{SG} < 1,0$ . Com a inserção dos grampos, observa-se um incremento de cerca de 40% no valor de FS. Entretanto, para o caso de face vertical, esta solução ainda resultaria numa condição de estabilidade não aceitável ( $FS=1,05$ ) para o projeto da escavação grampeada.

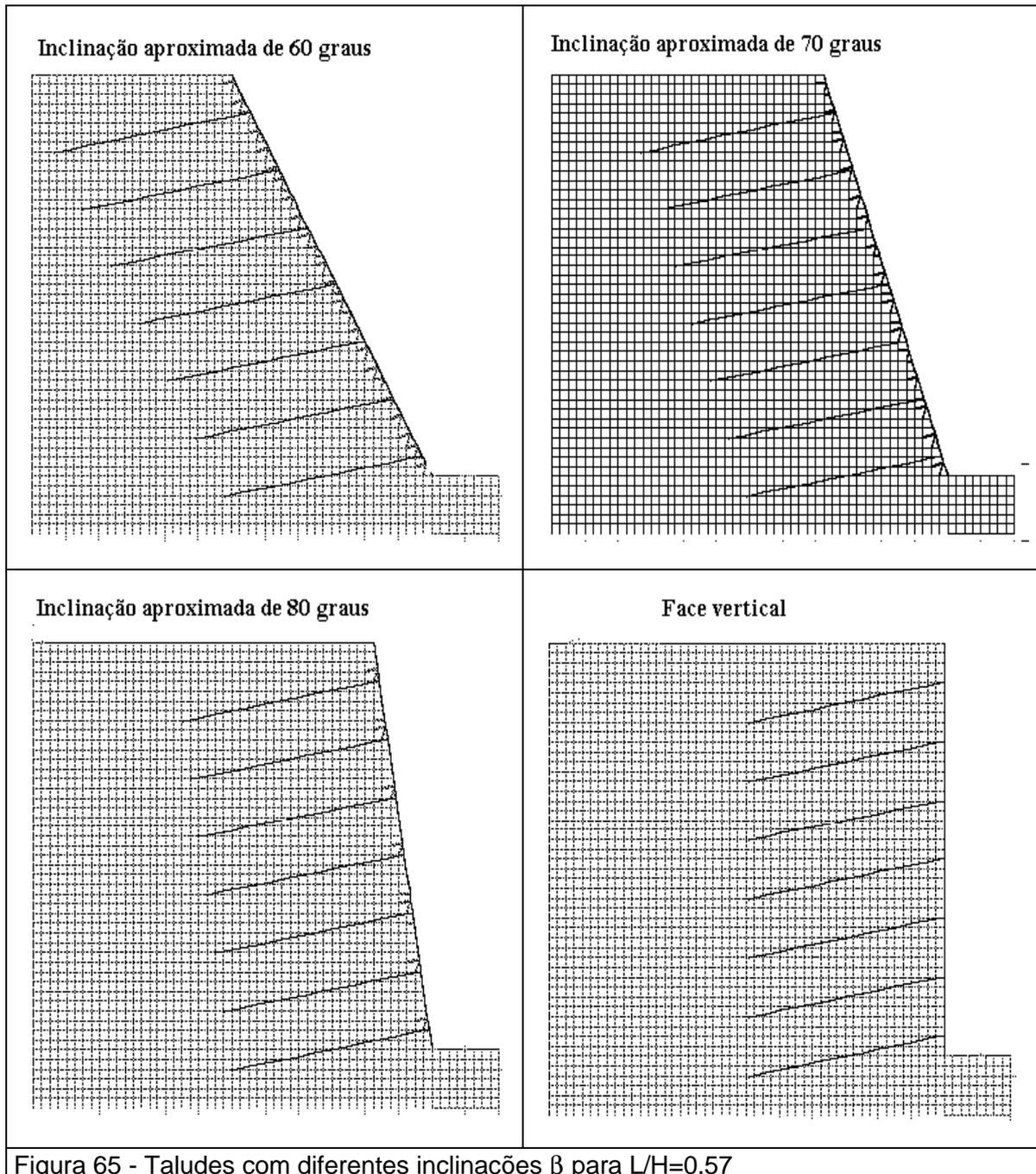


Figura 65 - Taludes com diferentes inclinações  $\beta$  para  $L/H=0,57$

Tabela 25 - Estabilidade do talude da escavação

Inclinação	Fator de Segurança (método de Bishop Simplificado)	
	Sem Grampo ( $FS_{SG}$ )	Com Grampo ( $FS_{CG}$ )
$\beta=60^\circ$	0,96	1,58
$\beta=70^\circ$	0,80	1,47
$\beta=80^\circ$	0,66	1,22
$\beta=90^\circ$	0,57	1,05

Deslocamentos horizontais ao longo de uma linha vertical, distante 1,0m do topo do talude, foram plotados em função da profundidade da malha, na última etapa de escavação,  $L/H=0,57$  (Figura 66). Este procedimento foi usado, inicialmente, devido à questão da geometria variável dos modelos numéricos e da possível influência da rigidez da parede nos deslocamentos. Deve-se lembrar que, no caso dos taludes de inclinação  $\beta=60^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $80^\circ$ , os deslocamentos horizontais a grandes profundidades correspondem a pontos relativamente distantes da parede. Já no caso do talude de face vertical,  $\beta=90^\circ$ , estes deslocamentos correspondem a pontos distantes 1,0m da parede de concreto projetado, independente da profundidade em questão.

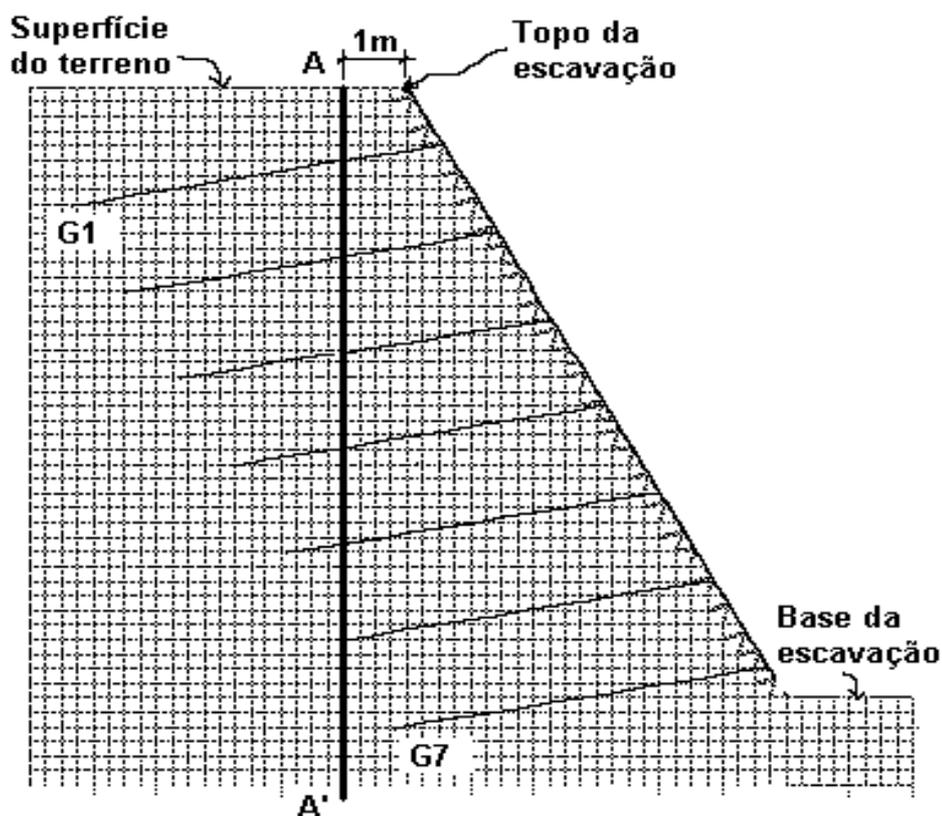


Figura 66 - Vertical AA' adotada para obtenção dos deslocamentos horizontais

Observando-se os vetores de deslocamento gerados pelo programa FLAC (Figura 67), para a última etapa de escavação ( $L/H=0,57$ ), nota-se um comportamento diferente com relação à direção dos deslocamentos, no caso de taludes verticais. A maior magnitude dos vetores, indicando a aparente formação de uma região potencial de ruptura, está em concordância com os resultados obtidos nas análises por equilíbrio limite para talude vertical.

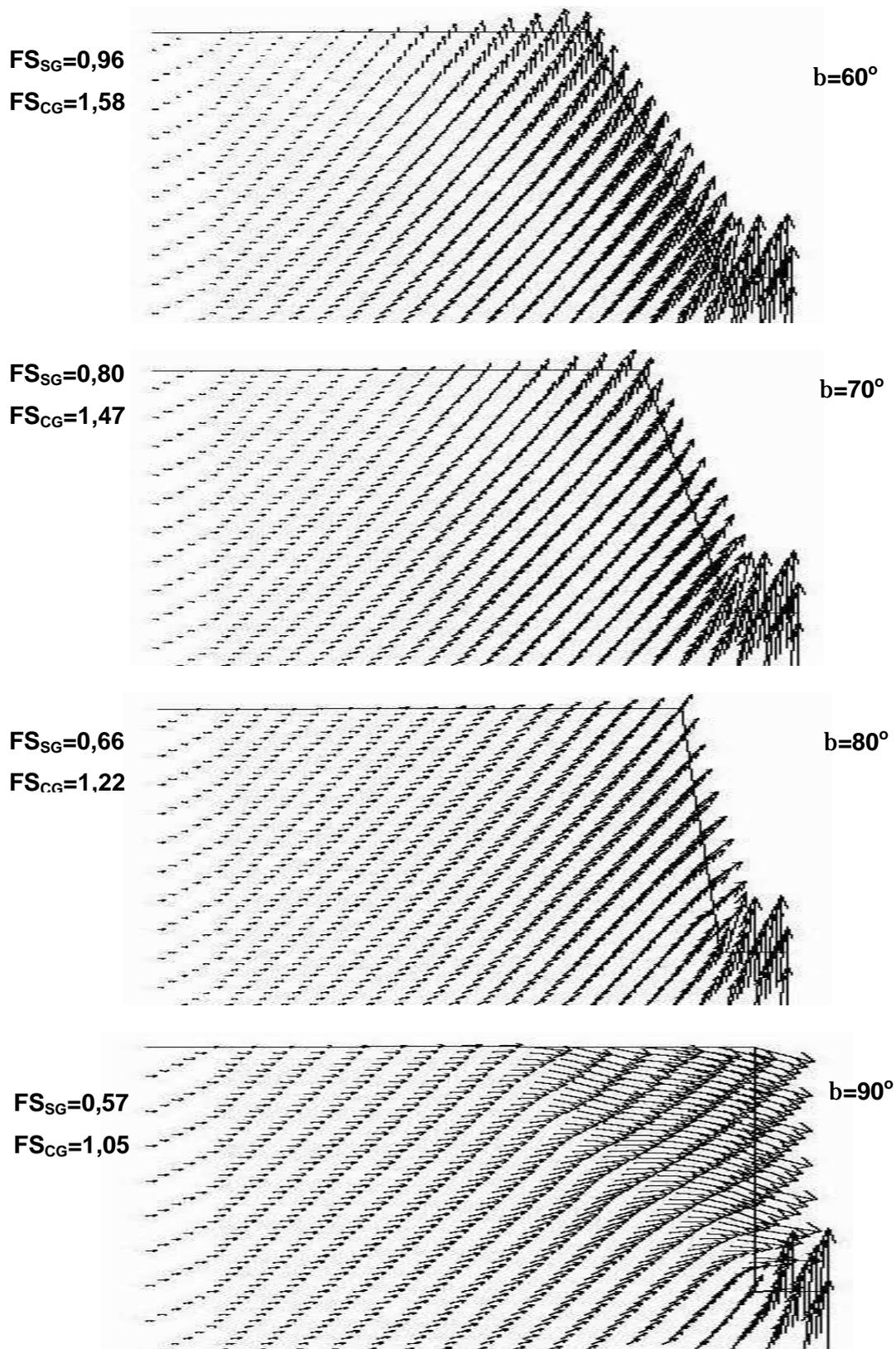


Figura 67 - Vetores de deslocamentos e fatores de segurança para taludes de solo grampeado ( $L/H=0,57$ )

A introdução do reforço, com as características geométricas adotadas neste trabalho, é insuficiente para estabilizar a massa de solo com face vertical, conforme indicam os valores de fatores de segurança sem grampo ( $FS_{sg}$ ) e com grampo ( $FS_{cg}$ ).

A Figura 68 apresenta os perfis de deslocamentos horizontais (a 1,0m do topo do talude), ao final da escavação ( $L/H=0,57$ ), para todas as inclinações  $\beta$ . Os resultados mostram a influência significativa da inclinação do talude nos deslocamentos horizontais, os quais crescem de magnitude à medida que o talude torna-se mais íngreme. A execução de escavações com taludes ligeiramente inclinados reduz significativamente a magnitude dos deslocamentos no topo. No caso estudado, observando-se os valores de deslocamentos fornecidos pelo programa, esta redução chega a 75%, quando se passa de uma escavação vertical para uma inclinação  $\beta=80^\circ$ . Adicionalmente, a forma dos deslocamentos também é afetada: deslocamentos máximos no topo da escavação só são observados em taludes verticais ( $\beta=90^\circ$ ). Instrumentação de obras de solo grampeado confirmam esta observação (Cardoso e Carreto, 1989; Plumelle et al., 1990; Barley, 1993; Unterreiner et al., 1995 e Shiu et al., 1997). Para pontos abaixo da base da escavação, a inclinação do talude afeta pouco os deslocamentos horizontais.

Estudos de recalques na superfície do terreno (crista do talude) também foram realizados. A Figura 69 mostra os deslocamentos verticais em função da distância ao ponto correspondente ao topo da escavação (ver Figura 66). Valores de deslocamentos verticais positivos, observados na região próxima a face da escavação, podem ser atribuídos a forma como a escavação é simulada numericamente. A magnitude dos deslocamentos verticais varia diretamente com a observada em termos de deslocamentos horizontal. Em taludes verticais, por exemplo, o elevado deslocamento horizontal em direção à escavação (Figura 68) corresponde a um deslocamento vertical também significativo. Os valores de recalque superficial independem de  $\beta$  a partir de uma distância de aproximadamente  $2H$  do topo da parede. A partir desta posição, os recalques superficiais já não são tão expressivos e sofrem influência reduzida da inclinação  $\beta$  (os deslocamentos em pontos a partir desta posição apresentam valores próximos a zero).

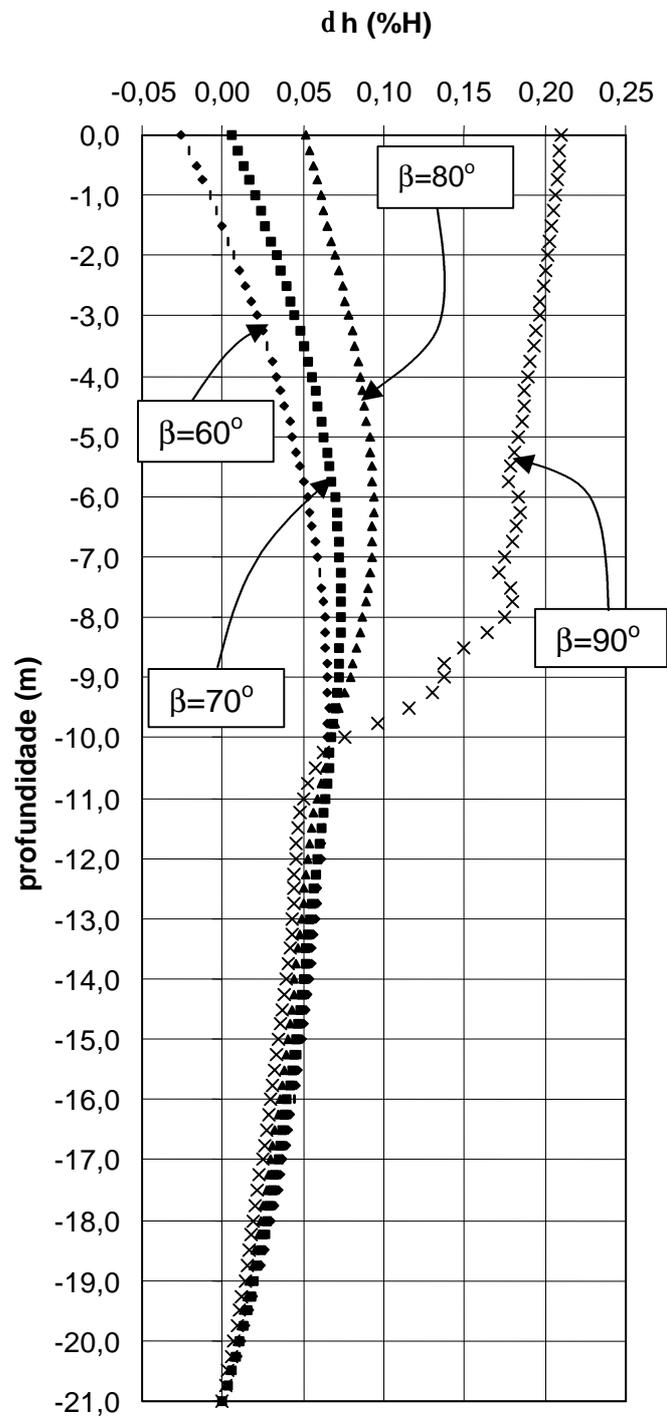
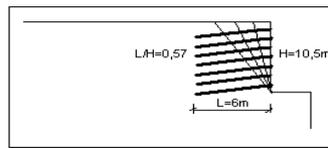


Figura 68 - Perfis de deslocamentos horizontais finais ( $L/H=0,57$ ), a 1,0m do vértice da escavação, em função da inclinação do talude ( $\beta$ )

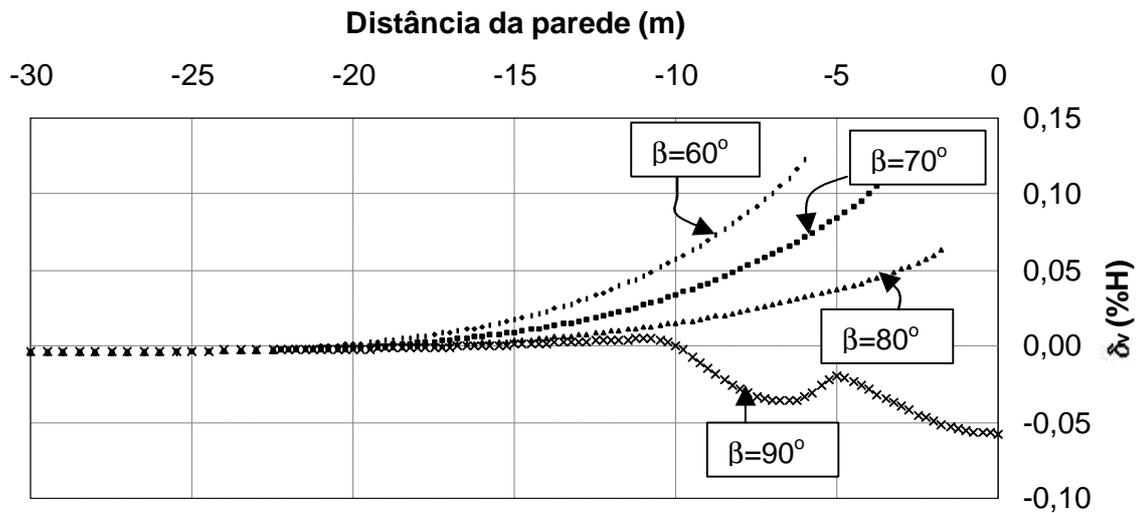


Figura 69 - Influência da inclinação do talude ( $\beta$ ) nos deslocamentos verticais finais ( $L/H=0,57$ ) ao longo da superfície do terreno (topo da escavação)

Com relação à base da escavação, observou-se de um modo geral um processo de elevação de fundo pouco sensível à inclinação da parede, conforme mostra a Figura 70. Em pontos próximos à base da escavação, valores mais elevados foram verificados em taludes verticais. A possível configuração de ruptura destes taludes pode explicar este comportamento distinto. A partir da distância de 0,5m da base da escavação, os deslocamentos verticais, independem da inclinação do talude, e são aproximadamente constantes, com valores entre 0,23%H e 0,30%H.

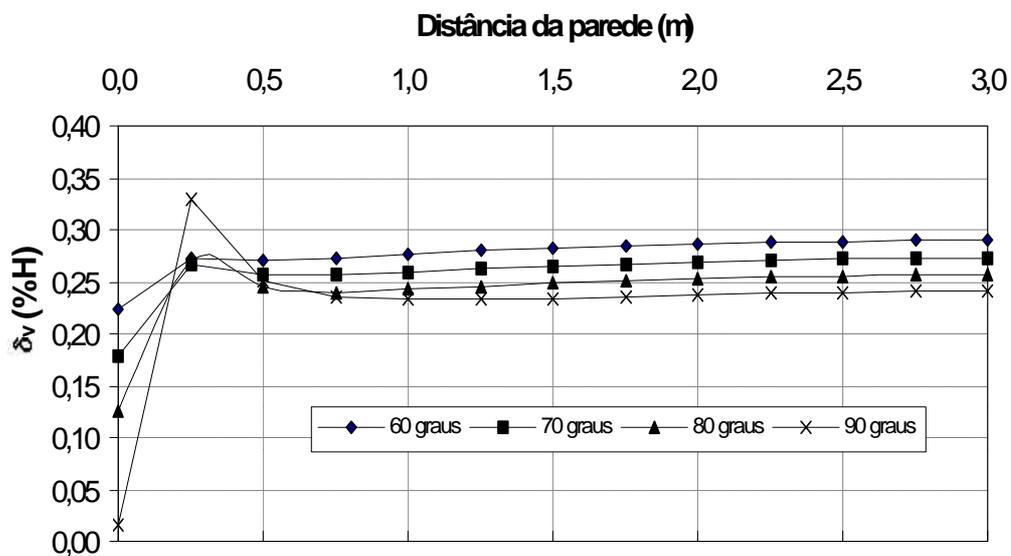


Figura 70 - Influência da inclinação do talude ( $\beta$ ) nos deslocamentos verticais finais ( $L/H=0,57$ ) na base da escavação (pé do talude)

Os esforços axiais máximos de tração ( $F_{\text{máx.}}$ ), na última fase de escavação ( $L/H=0,57$ ), apresentam-se maiores em taludes mais íngremes (Figura 71). Os resultados indicam que os grampos mais próximos à superfície contribuem menos na contenção do solo do que os inferiores. Para os exemplos estudados, o grampo mais solicitado em taludes verticais localiza-se a 7,5m de profundidade (grampo 05), enquanto que, em taludes com inclinações de  $60^\circ$  e  $70^\circ$ , o grampo mais solicitado situa-se a 9,0m de profundidade (grampo 06).

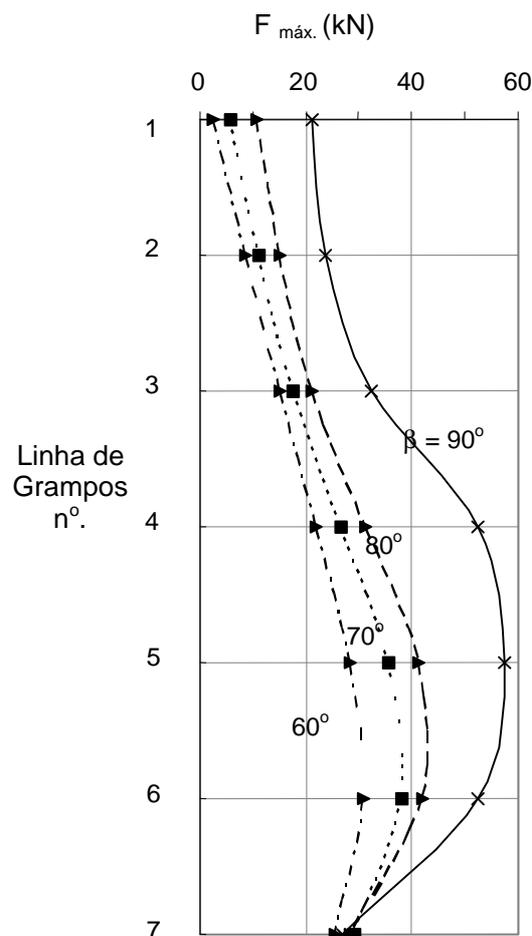


Figura 71 - Influência da inclinação do talude ( $\beta$ ) nos esforços axiais máximos na última etapa de escavação ( $L/H=0,57$ )

Um estudo comparativo da evolução dos valores de força axial máxima na primeira linha de grampos, localizada na profundidade de 1,5m está apresentado na Figura 72. Pode-se notar um ligeiro aumento na magnitude dos esforços de tração na primeira linha de grampos à medida que se segue com o processo de escavação. Para profundidades de escavação maiores, a mobilização da primeira linha de grampos é acentuada, em particular para as

inclinações de 80° e 90°. Em taludes com  $\beta=60^\circ$  e 70°, não há um aumento considerável dos esforços axiais nos grampos durante toda a evolução da escavação da escavação.

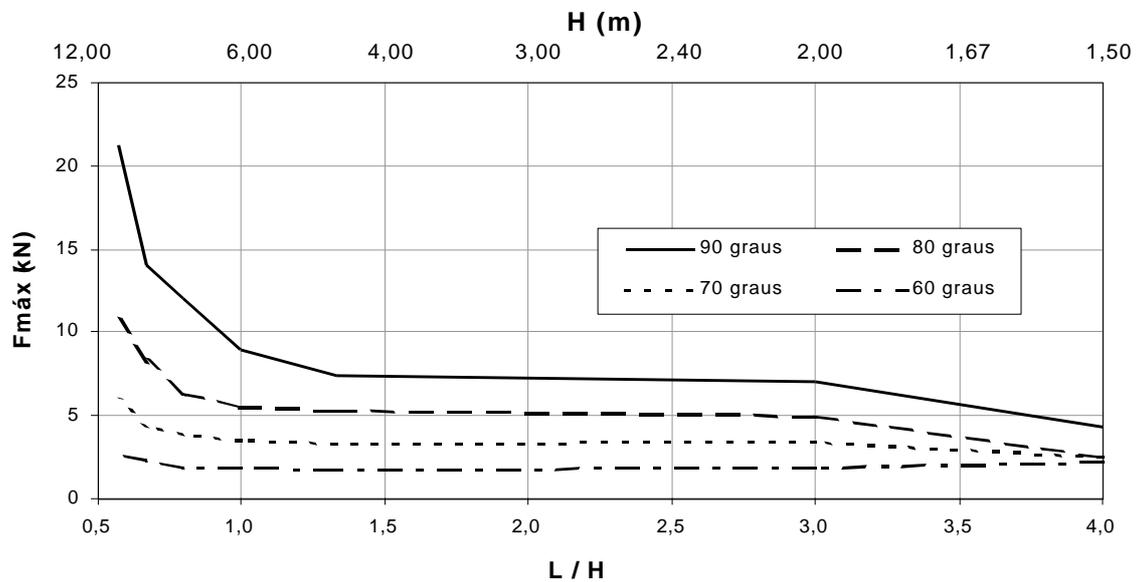


Figura 72 - Influência da inclinação do talude ( $\beta$ ) nos esforços axiais máximos na primeira linha de grampos (profundidade de 1,50m) nas diversas etapas de escavação

A título de comparação, a Figura 73 mostra que todos os grampos, nesta modelagem, estão trabalhando sob cargas previstas significativamente inferiores à resistência admissível para barra de aço CA-50 ( $F_{esc.}=245,4\text{kN}$ ). Considerando, para carga de trabalho, um fator de majoração de 1,4, e limitando as cargas à condição de 90% da carga de escoamento, o limite máximo admissível para a relação  $F_{máx.}/F_{escoamento}$  é de 64,3%, ou seja,  $F_{máx. (admissível)}=157,8\text{kN}$  (Springer et al., 2001).

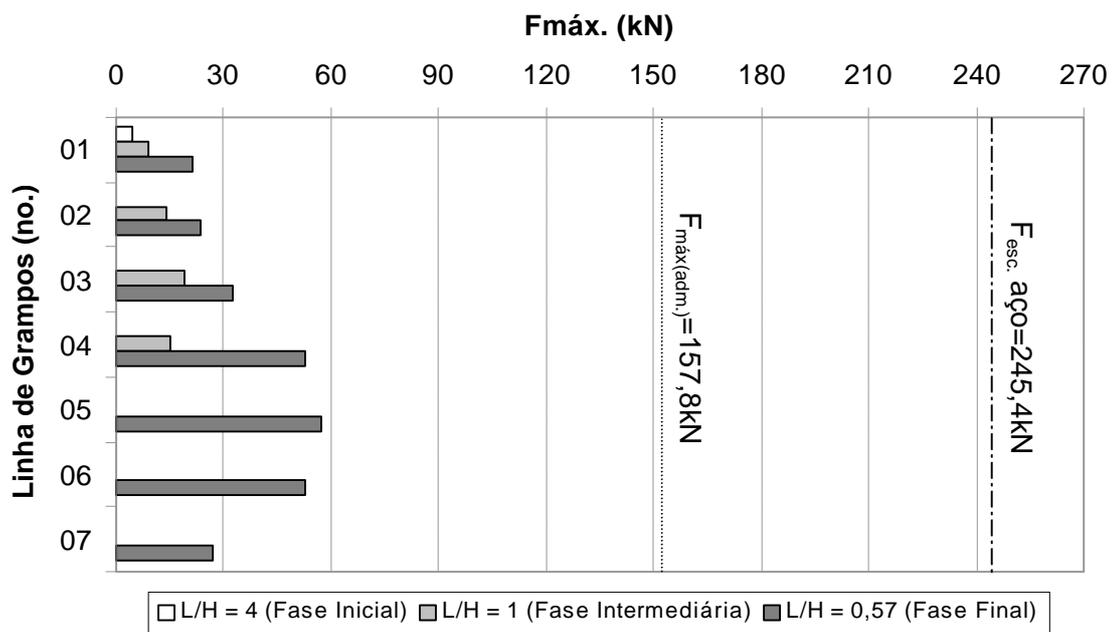


Figura 73 - Magnitude das forças axiais máximas desenvolvidas nos grampos em função da profundidade de escavação

#### 4.2.2. Número de etapas de escavação

Respeitando-se todos os parâmetros e metodologia adotados por Kirsten (1991), realizou-se um estudo buscando-se avaliar a influência do número de fases de escavação nos deslocamentos horizontais finais, próximos à face, em função da profundidade. Foram feitas análises admitindo-se um processo de escavação em uma única etapa e em 2, 4, 6 e 8 fases, conforme mostra a Figura 74. Em todos os casos os grampos apresentaram comprimentos variáveis entre 4 e 6m, havendo tirantes com comprimentos de 8m na base da escavação (Figura 75).

O modelo constitutivo empregado para representar o solo foi o modelo elasto-perfeitamente plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A parede foi representada por elementos de viga, com resistência à flexão.

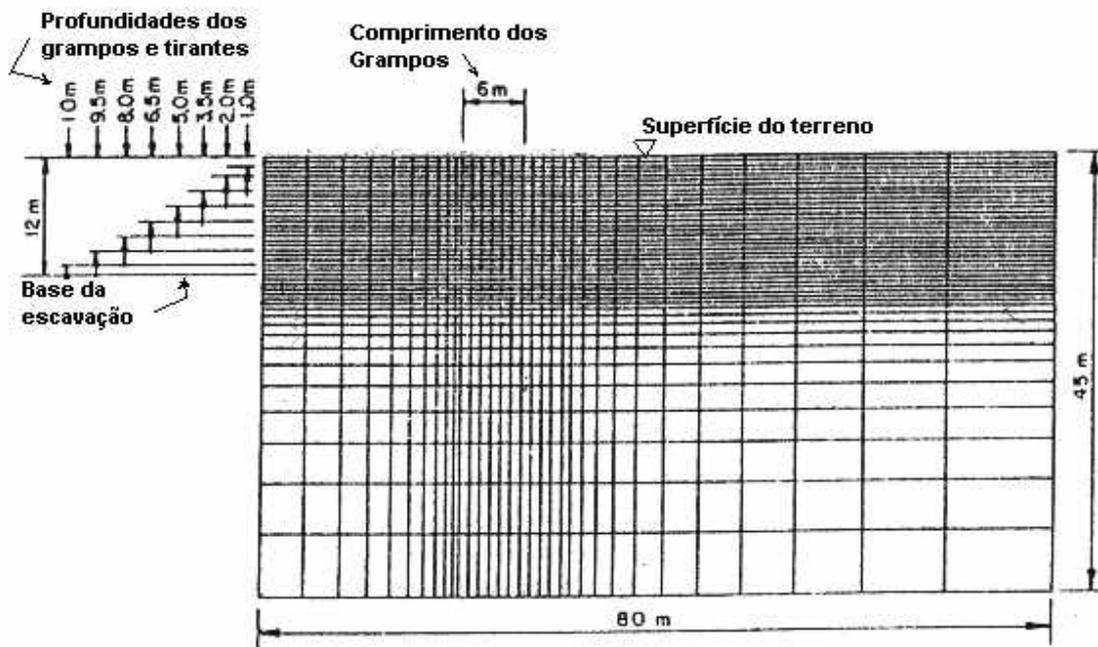


Figura 74 - Discretização da malha utilizada

Os parâmetros geomecânicos empregados nas análises estão explicitados na Tabela 26. Barras de aço protendidas, indicadas na Figura 75, foram posicionadas na base e no topo da escavação. Todos os parâmetros geomecânicos utilizados para os grampos e tirantes foram arbitrados, pois não foram fornecidos por Kirsten (1991).

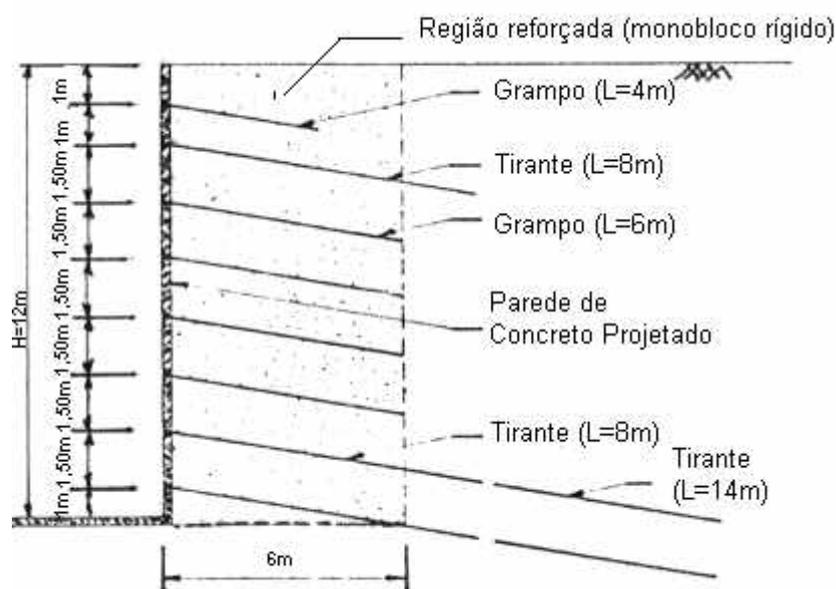


Figura 75 - Seção transversal do monobloco rígido

Tabela 26 - Propriedades geomecânicas

Parede		Solo								
$E_{\text{parede}}$ GPa	$h_{\text{parede}}$ cm	$E_{\text{solo}}$ MPa	$\nu$	$\gamma$ KN/m <sup>3</sup>	$c'$ kPa	$\phi'$ graus	$\psi$ graus	$k_0$		
50	5	10	0,2	20	25	29	0	0,52		
Grampos					Tirantes					
$\phi_{\text{aço}}$ mm	$\phi_{\text{furo}}$ mm	$\sigma_{\text{aço}}$ MPa	$E_{\text{aço}}$ GPa	$G_{\text{injeção}}$ GPa	$q_s$ kPa	$\phi_{\text{aço}}$ mm	$\phi_{\text{furo}}$ mm	$\sigma_{\text{aço}}$ MPa	$E_{\text{aço}}$ GPa	$T_{\text{trab}}$ $t_f$
25	100	500	205	9,0	63/102	32	100	500	205	10/30

$\phi_{\text{aço}}$ =diâmetro da barra de aço,  $\phi_{\text{furo}}$ =diâmetro do furo,  $\sigma_{\text{aço}}$ =tensão de escoamento do aço,  $E$ =módulo de Young,  $G$ =módulo cisalhante,  $q_s$ =resistência ao arrancamento do grampo,  $T_{\text{trab}}$ =carga de trabalho do tirante,  $h_{\text{parede}}$ =espessura da parede,  $\nu$ =coeficiente de Poisson,  $\gamma$ =peso específico natural,  $c'$ =coesão efetiva,  $\phi'$ =ângulo de atrito,  $\psi$ =ângulo de dilatação,  $k_0$ =coeficiente de empuxo no repouso.

Os deslocamentos horizontais finais (Figura 76) comprovam que o número de estágios de escavação influencia nos deslocamentos da parede. Os resultados, entretanto, mostram que para número de etapas superior a 2 as diferenças são menos significativas. As escavações em etapas, mais usuais na prática da engenharia, fornecem valores maiores de deslocamento no topo (cerca de 24mm). A simulação de um único estágio de escavação forneceu valores da ordem de 3,1mm no topo.

Nas Figuras 77 e 78 estão plotados os indicadores de plastificação ( $IP_L$ ), que delimitam as regiões que sofreram algum tipo de plastificação. Ressalta-se que, sempre que se aplica qualquer tipo de carregamento ou descarregamento, o FLAC admite o desenvolvimento de regiões de plastificação (vide item 3.9.2).

A presença de regiões de plastificação, na escavação em etapas (Figura 77), não observadas na escavação em uma única fase (Figura 78), indica que determinados elementos atingiram a superfície de ruptura. conseqüentemente, variações subseqüentes no estado de tensões desses elementos são transferidas para elementos adjacentes, fazendo com que, de um modo geral, as deformações atinjam níveis mais elevados. Este resultado pode ser visto como uma limitação do programa FLAC que não possui um modelo que traduza o comportamento tensão-deformação não linear.

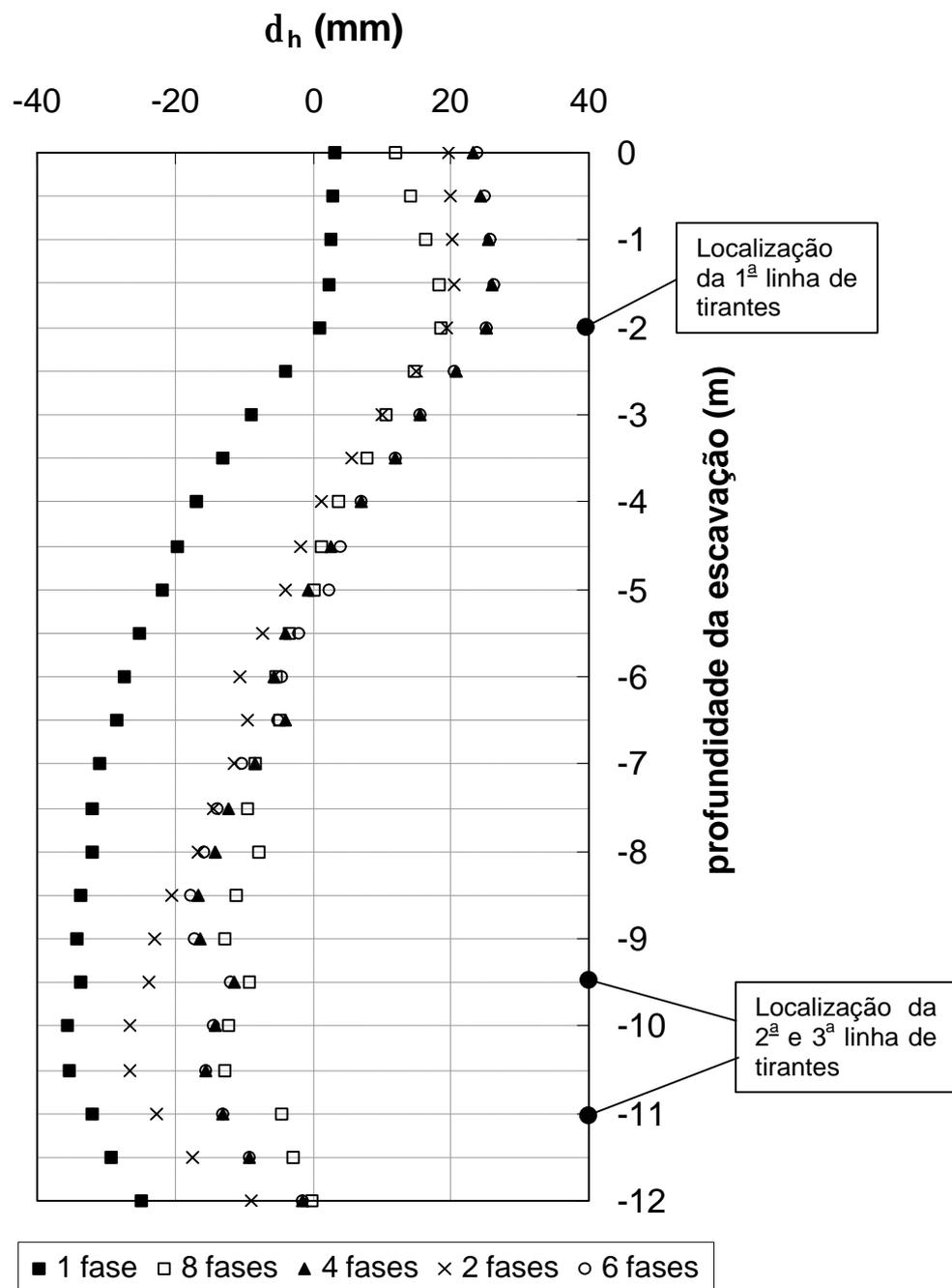
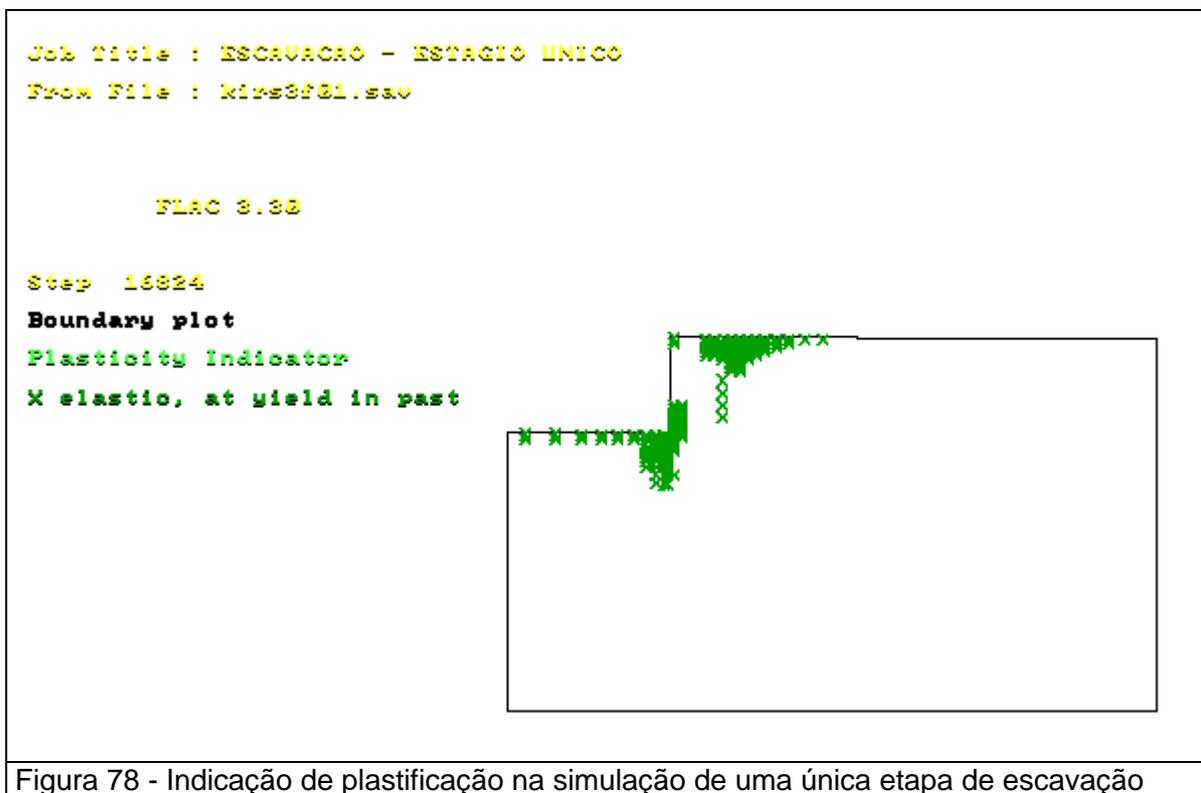
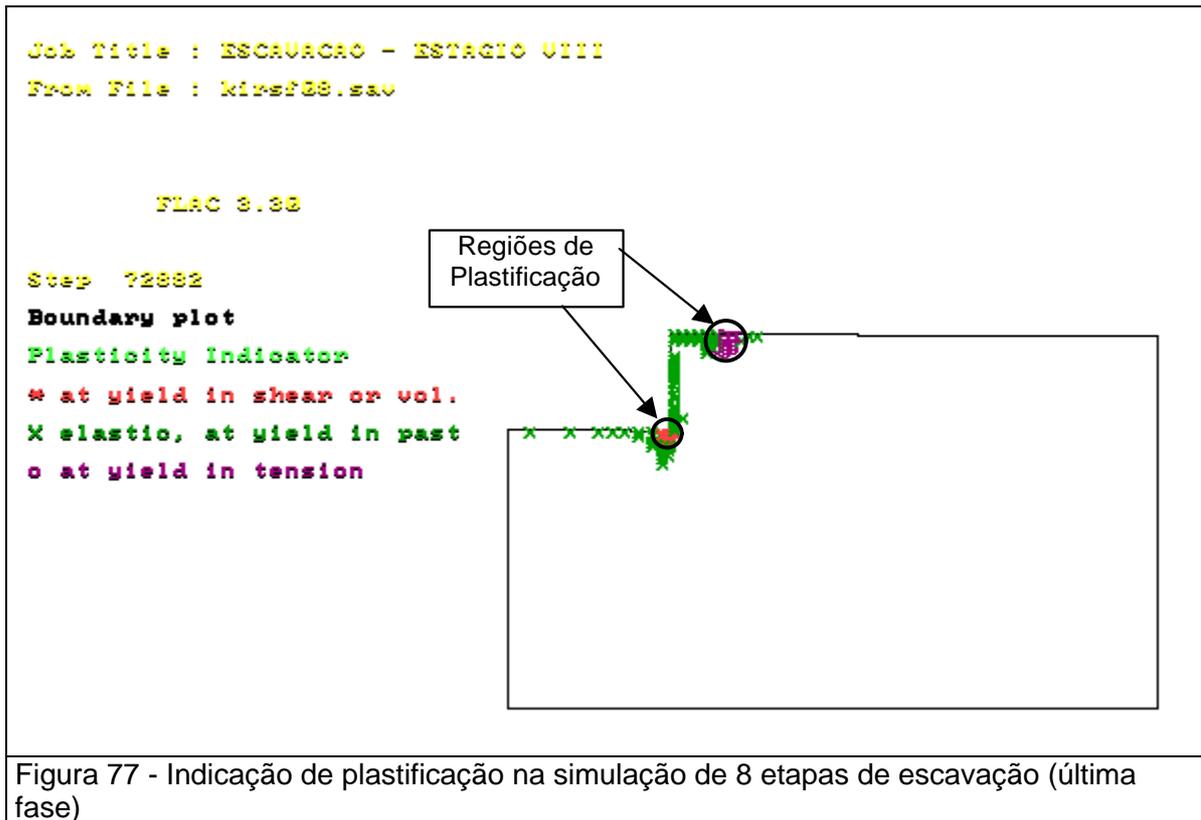


Figura 76 - Influência das etapas de escavação nos deslocamentos finais na face da escavação ao longo da profundidade



### 4.2.3. Espessura da parede

Estudos de deslocamentos horizontais ao longo da profundidade de escavação da malha foram realizados com diferentes espessuras da parede. Em todas as análises, a parede foi modelada como elemento de viga com módulo de Young constante ( $E_{\text{parede}}=50\text{GPa}$ ), variando-se o momento de inércia ( $MI_{\text{parede}}$ ) e a área da seção transversal ( $a_{\text{parede}}$ ), conforme mudança na espessura da mesma. Nestes estudos, adotou-se a mesma configuração apresentada nas Figuras 74 e 75. A geometria, assim como condições de contorno estão apresentadas na Figura 79. Os parâmetros geomecânicos dos grampos, tirantes e do solo foram os mesmos indicados na Tabela 26. Os casos considerados foram: parede com 200mm, 100mm, 50mm de espessura e finalmente a consideração da não existência de parede.

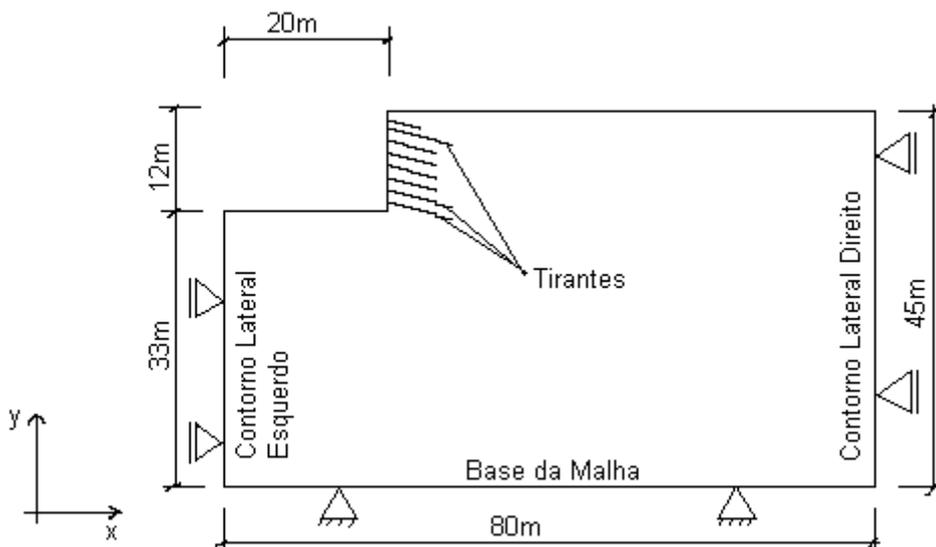


Figura 79 - Geometria e condições de contorno da malha

Os resultados apresentados na Figura 80 mostram que, para o modelo analisado, paredes com espessura de 100mm e 200mm apresentam valores de deslocamentos similares. Adicionalmente, percebe-se a influência da posição dos tirantes nos deslocamentos horizontais na face da escavação, principalmente nas estruturas mais flexíveis ( $h=50\text{mm}$ ).

Em relação ao topo da escavação, deslocamentos positivos foram gerados para os casos de  $h_{\text{parede}}=100\text{mm}$  e  $h_{\text{parede}}=200\text{mm}$ . Para os demais casos, valores negativos no topo foram observados.

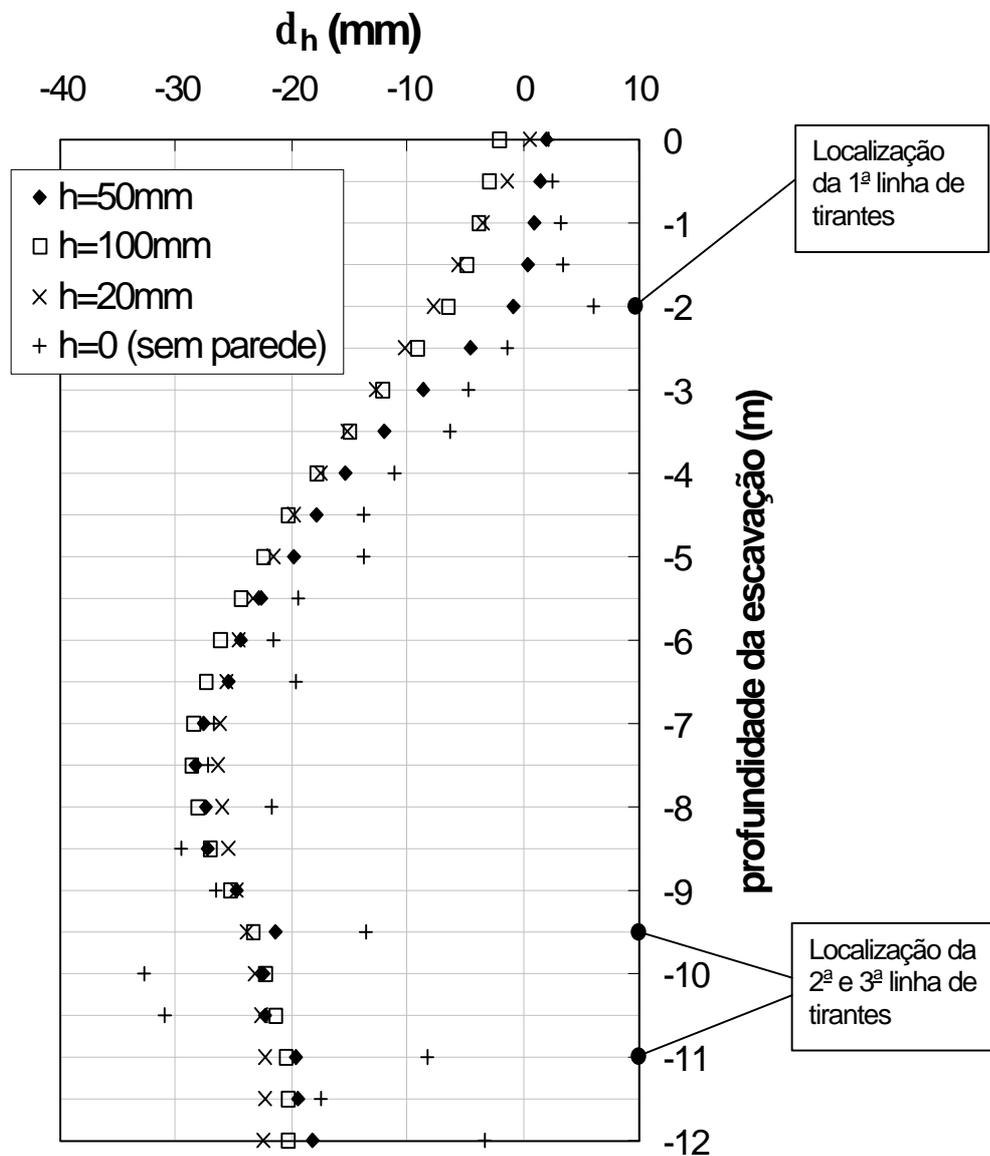


Figura 80 - Influência da espessura da parede nos deslocamentos horizontais finais na face da escavação

#### 4.2.4. Condições de contorno e geometria da malha

De modo a se avaliar a influência dos contornos laterais e da geometria da malha nos deslocamentos ao longo da escavação, foram analisados os valores de deslocamentos horizontais no topo da escavação para diferentes

condições de contorno e relações geométricas da malha da escavação. O modelo constitutivo empregado para representar o solo foi o modelo elasto-plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros do grampo e da parede foram indicados na Tabela 26.

Estudos numéricos foram realizados fixando-se a altura de escavação ( $H$ ) em 12m. A geometria inicial utilizada está definida na Figura 81. A simulação da escavação foi realizada em um único estágio. Os deslocamentos horizontais no topo da escavação foram plotados em função de alterações na geometria da malha e das condições de contorno impostas. Para cada relação geométrica da malha com  $Be/H$  e  $We/H$  variando entre 1 e 10, foram obtidos os deslocamentos horizontais no topo da escavação, restringindo-se ou não os deslocamentos na direção vertical. Através destas simulações, pode-se determinar condições adequadas de geometria e contornos para o estudo de escavações em solo grampeado. A Tabela 27 fornece um resumo dos casos estudados.

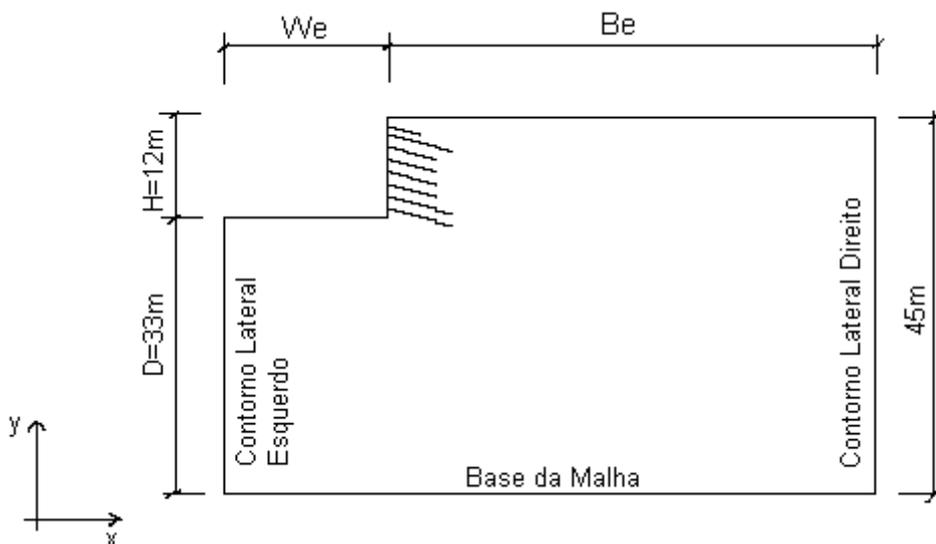


Figura 81 - Configuração utilizada no estudo dos contornos

A Figura 82 mostra os valores de deslocamentos no topo da escavação em função do valor de  $Be/H$ . Os resultados indicam que a influência das condições de contorno da vertical lateral direita é significativa para valores de  $Be/H$  inferiores a 4. A partir desta relação, os valores de  $Be/H$ , com ou sem restrição dos deslocamentos na direção vertical, ficam muito próximos e passam a não ter mais influência nos deslocamentos horizontais na parede.

Tabela 27 - Quadro resumo dos casos estudados

Definição do contorno lateral direito e do parâmetro Be															
Valores estudados de Be/H								Valores estudados de Be/H							
1	2	3	4	5	6	7	10	1	2	3	4	5	6	7	10

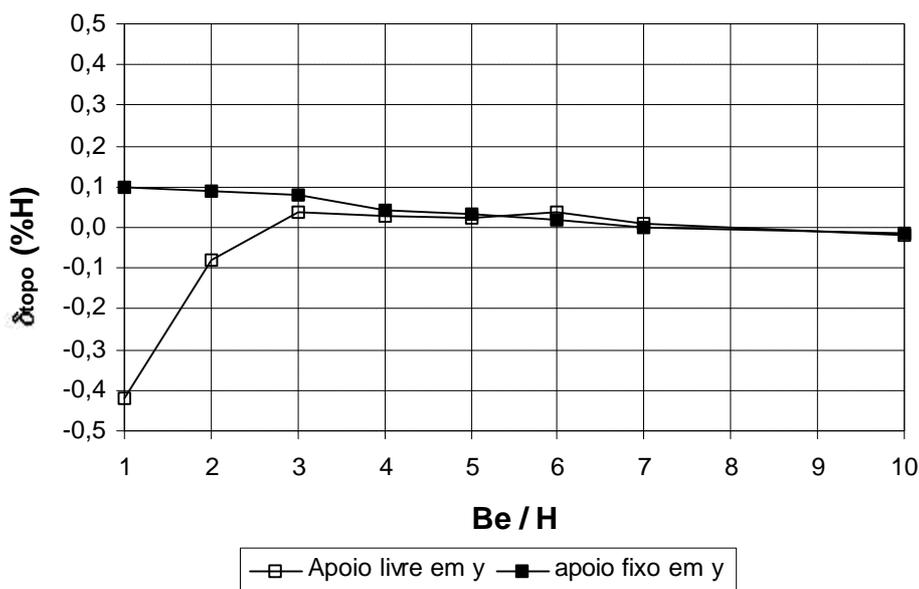


Figura 82 - Deslocamentos horizontais no topo vs. a distância Be

A análise da Figura 82 indica que a relação  $Be/H \geq 4$  pode ser considerada em problemas de escavações com solo grampeado utilizando o programa FLAC. A partir desta relação, a variação dos deslocamentos horizontais na face da escavação será desprezível para qualquer condição de contorno lateral direito imposta.

Com relação à influência do contorno lateral esquerdo, a geometria estudada demonstra ser aceitável no caso de escavações que apresentam

simetria. Em outras situações, o contorno lateral esquerdo deve estar afastado da região da escavação, de modo a não interferir nos resultados.

Briaud e Lim (1997) propõem uma definição de parâmetros geométricos para não influenciar os deslocamentos horizontais no topo, conforme demonstrado na Figura 50. De certa forma, a geometria empregada neste estudo, para escavações simétricas, é aceitável às proposições dos autores.

### 4.3. Influência da forma de modelagem da parede

Tendo em vista a influência nos deslocamentos horizontais do tipo de tratamento numérico dado à face da escavação (Caliendo et al., 1995), foram realizados estudos variando-se o tipo de elemento e o modelo constitutivo de representação da parede. Nestes estudos, adotou-se o mesmo modelo físico apresentado nas Figuras 74 e 75. A estrutura da parede foi representada por elementos de viga unidimensionais e por elementos bidimensionais com comportamento elástico linear. A Tabela 28 apresenta um quadro resumo dos parâmetros utilizados nas análises. A espessura da parede foi considerada como sendo igual a 50cm nas análises cuja parede foi representada por elementos bidimensionais. Espessuras menores exigiriam um nível de discretização da malha que aumentaria demasiadamente o tempo computacional deste tipo de análise.

Tabela 28 - Influência do tipo de modelagem da parede

Modelagem da Parede	Parâmetros da parede						
	$h_{\text{parede}}$ (cm)	$a_{\text{parede}}$ (m <sup>2</sup> )	$MI_{\text{parede}}$ (m <sup>4</sup> )	$E_{\text{parede}}$ (GPa)	$\nu_{\text{parede}}$	$\gamma_{\text{parede}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$C_{\text{parede}}$ (kPa)
Elemento de Viga	5	0,50	$1,042 \times 10^{-2}$	50	*	*	*
Elemento 2D - linear elástico	50	*	*	50	0,20	25	*
	50	*	*	10	0,20	25	*
	50	*	*	5	0,20	25	*

$h_{\text{parede}}$ =espessura da parede,  $a_{\text{parede}}$ =área da seção transversal da parede,  $MI_{\text{parede}}$ =momento de inércia da parede,  $E_{\text{parede}}$ =módulo de Young da parede,  $\nu$ =coeficiente de Poisson da parede,  $\gamma$ =peso específico do material da parede,  $C_{\text{parede}}$ =coesão aparente do material da parede.

Obs.: (\*)=Parâmetro não necessário no arquivo de entrada de dados.

Os deslocamentos horizontais relacionados com a última fase de escavação estão plotados na Figura 83. Nesta figura, a parede modelada com elementos de viga mostra-se mais flexível. O perfil de deslocamentos horizontais mostra redução de deslocamentos nas profundidades de 2,0m, 9,5m e 11,0m, correspondentes a posição de instalação dos tirantes.

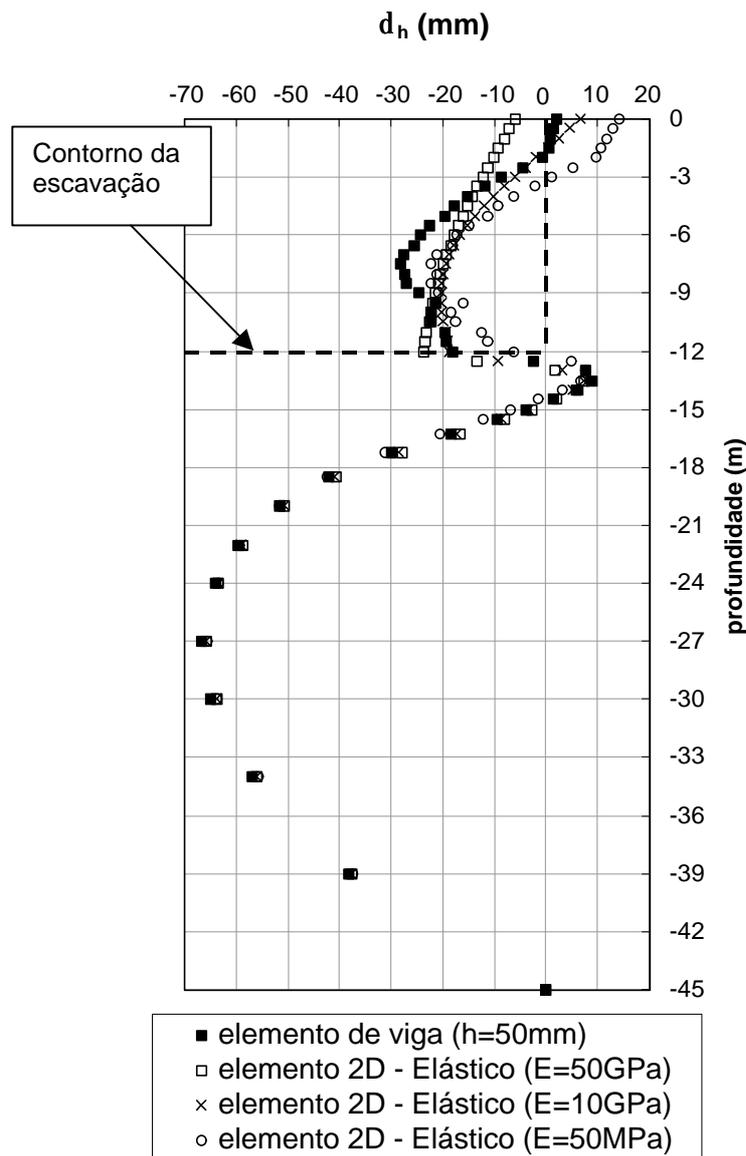


Figura 83 - Influência do tipo de modelagem da parede nos deslocamentos horizontais finais na face da escavação

Já a parede modelada como material 2D perfeitamente elástico e isotrópico, indica um padrão de deslocamento semelhante ao de um corpo rígido, quando é adotado o valor do módulo de Young da parede

( $E_{\text{parede}}=50\text{GPa}$ ), correspondente ao módulo do concreto. Este comportamento já era esperado e é resultado da elevada rigidez imposta à estrutura. Para reduzir este efeito, atribuiu-se à parede um módulo de deformabilidade reduzido ( $E_{\text{parede}}=5\text{GPa}$ ), tal que a rigidez da parede ( $E \times MI$ ) fosse equivalente àquela apresentada pelo elemento de viga. Neste caso, o perfil de deslocamento horizontal se assemelha ao fornecido pelo elemento de viga, tendo sido registrados, em toda escavação, menores valores de deslocamento.

Como resultado destas análises, verifica-se que a o tipo de modelagem da parede resulta em diferentes padrões de deslocamento. A experiência registrada na literatura, entretanto, tem sugerido a utilização de elementos de viga na modelagem da parede. Conclusões semelhantes foram apontadas por Caliendo et al. (1995) e Itasca (1996).

#### **4.4. Escavações grampeadas em solo residual**

A metodologia de projetos de estruturas em solo grampeado baseia-se, na maioria dos casos, em métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite. Em geral, os projetos desprezam os mecanismos das deformações ocorridas no interior da massa de solo grampeada. A necessidade de se obter informações sobre as deformações inerentes ao sistema de estabilização por solo grampeado requer estudos de estabilidade por métodos numéricos. Os casos estudados simularam o comportamento tensão-deformação de taludes em solos residuais usualmente encontrados nas encostas do Rio de Janeiro. Uma revisão dos parâmetros representativos deste tipo de solo foi apresentada no Capítulo II.

O espaçamento horizontal ( $Sh$ ) e vertical ( $Sv$ ) entre grampos, o comprimento do grampo ( $L$ ) e a altura de escavação ( $H$ ) foram os parâmetros considerados variáveis nestas análises.

##### **4.4.1. Definição da malha**

A discretização da malha do maciço da escavação procurou obedecer a critérios geométricos definidos no item 4.2.4. A superfície do terreno ( $Be$ ) apresenta dimensões superiores a 4 vezes a altura da escavação ( $H$ ). Os

contornos laterais foram fixados apenas na direção horizontal. Para  $B_e/H > 4$ , pode-se adotar este tipo de restrição.

A geometria adotada consistiu em uma malha retangular de 66 elementos horizontais e 56 elementos verticais. São apresentados nove tipos distintos de discretização com elementos de 0,50m na horizontal por 2,50m na vertical seguidos de elementos de 0,50m por 1,50m e 0,50m por 0,50m. A seguir, elementos de 1,50m x 2,50m, 1,50m x 2,50m, 1,50m x 0,50m e, finalmente, elementos de 2,50m x 2,50m, 2,50m x 1,50m e 2,50m X 0,50m, conforme mostra a Figura 84. As alturas de escavação (H) propostas foram de 5m e 10m. Regiões próximas à escavação apresentaram um refinamento na discretização. Os limites entre as fronteiras são de 61,0m na horizontal e na vertical. As dimensões finais do modelo estudado estão apresentadas na Figura 85.

```
Job Title : SOLO GRAMPEADO 01  
From File : sgif8.sav
```

```
FLAC 3.38
```

```
Step 3888
```

```
Grid plot
```

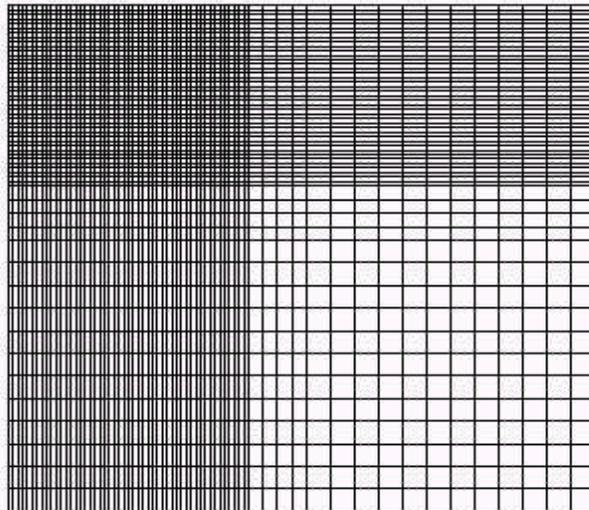


Figura 84 - Discretização da malha utilizada

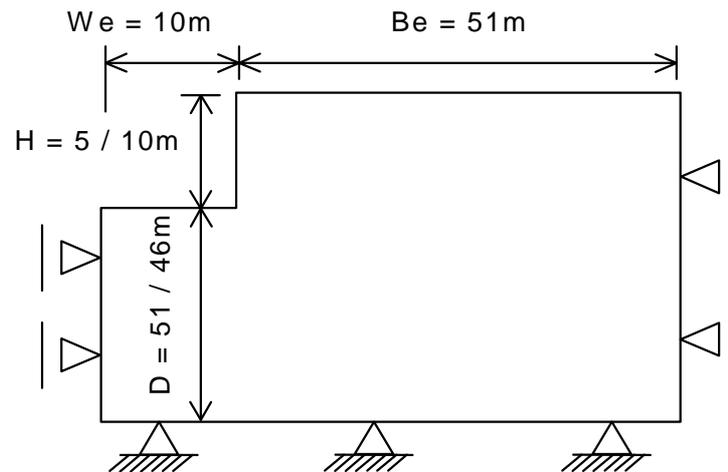


Figura 85 - Parâmetros geométricos do modelo estudado.

#### 4.4.2. Definição dos parâmetros do solo

O modelo constitutivo empregado para representar o solo foi o modelo elasto-plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. É um modelo bastante utilizado como uma aproximação em primeira ordem do problema estudado

Para a aplicação do modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb, deve-se definir cinco parâmetros relacionados ao solo: módulo de deformabilidade do solo ( $E_{\text{solo}}$ ), coeficiente de Poisson do solo ( $\nu$ ), para o trecho elástico, coesão do solo ( $c$ ) e ângulo de atrito do solo ( $\phi$ ), para a plasticidade do solo e o ângulo de dilatação ( $\psi$ ).

A metodologia utilizada na obtenção destes parâmetros consistiu em selecionar ensaios em amostras de solo residual jovem, não saturado (umidade natural) e saturado (amostras submersas). Buscou-se assim atender às condições usualmente apresentadas nos solos residuais em estruturas de contenção com solo grampeado. Os parâmetros foram obtidos tomando-se como base os ensaios de laboratório realizados por Aleixo (1998).

- Módulo de deformabilidade do solo ( $E_{\text{solo}}$ ):

Sabe-se, de imediato, que o valor do módulo de deformabilidade do solo tem grande influência nas análises feitas pelo FLAC. Em estudos paramétricos realizados por Springer (2001), observou-se que este parâmetro atua diretamente na magnitude dos deslocamentos. Para valores pequenos de  $E_{\text{solo}}$ , da ordem de 10MPa, o programa fornece resultados de deslocamento horizontal

muito superiores aos observados na literatura (usualmente entre 0,10%H e 0,30%H).

Assim sendo, com o objetivo de se corrigir os valores de deformabilidade do solo obtidos em ensaios triaxiais de carregamento axial ( $\sigma_3 = \text{cte.}$  no cisalhamento), foram introduzidos dois fatores de correção:  $FC_1$ , relativo a diferenças entre campo e laboratório (amolçamento, história de tensões, etc.) e  $FC_2$ , relativo a trajetória de tensões empregada no ensaio.

O valor de  $FC_1$  igual a 2,0 foi adotado, baseando-se em observações feitas por Sandroni (1985 e 1991) e Sieira (1998).

Quando o módulo de deformabilidade for obtido em ensaios triaxiais de carregamento axial, adota-se um valor de  $FC_2$ , em função da diferença nas trajetórias de tensões entre laboratório e campo (compressão axial/extensão lateral). Ensaio de descarregamento lateral ( $\sigma_1 = \text{cte.}$  no cisalhamento), que simulam a execução de uma escavação em solo grampeado, fornecem valores de  $E_{\text{solo}}$  superiores aos obtidos em ensaios triaxiais convencionais. O valor de  $FC_2$  igual a 2,5 foi empregado baseando-se em estudos realizados por Pontes Filho (1981), Carpio (1990) e Sayão et al. (1999).

Deve-se ressaltar que os valores de  $FC_1$  e  $FC_2$ , foram estipulados com base em comparações de módulos de deformabilidade ( $E_{50}$ ) correspondentes a um acréscimo de tensão desviadora igual a 50% do acréscimo na ruptura, em ensaios para o mesmo nível de tensões confinantes (até 200kPa) e condições iguais de drenagem. Assim sendo, nestas condições, têm-se:

$$E_{\text{solo}} = E_{50} \cdot FC_1 \cdot FC_2, \text{ onde } FC_1 = 2,0 \text{ e } FC_2 = 2,5$$

Logo:  $E_{\text{solo}} = 5E_{50}$ , em todas as análises feitas pelo FLAC, utilizando amostras de solos residuais obtidas em ensaios triaxiais de carregamento axial.

Para as amostras reportadas por Aleixo (1998), têm-se as seguintes correções:

$$\text{Amostra "JNO"} \rightarrow E_{50} \text{ 14,3MPa} \therefore E_{\text{solo}} = 5E_{50} \cong 72\text{MPa}$$

- Coeficiente de Poisson do solo ( $\nu$ ):

$$\text{Amostra "JNO"} \rightarrow \nu = \nu_{50} = 0,15$$

- Ângulo de atrito do solo ( $\phi$ ):

$$\text{Amostra "JNO"} \rightarrow \phi = \phi' \cong 20^\circ$$

- Coesão do solo ( $c$ ):

Amostra “JNO” →  $c=60\text{kPa}$  (amostras com umidade natural).

- Ângulo de dilatância ( $\psi$ ):

Pode ser determinado em ensaios de laboratório onde se medem as variações volumétricas no corpo de prova (ensaios triaxiais). O valor de  $\psi$  foi admitido como nulo, pois para  $\psi < 15^\circ$ , as variações são pouco significativas nos deslocamentos horizontais (Springer, 2001).

Amostra “JNO” → Admitido como  $\psi=0^\circ$ .

A seguir, são descritos outros parâmetros necessários para a definição das características do solo, segundo o programa FLAC (Itasca, 1996):

- Peso específico do solo ( $\gamma$ ):

Amostra “JNO” →  $\gamma=17,8\text{kN/m}^3 \cong 18\text{kN/m}^3$ .

- Coeficiente de Empuxo no Repouso ( $k_o$ ):

Arbitrado em  $k_o=0,55$  (Maccarini, 1980).

Convém ressaltar que fatores de segurança globais foram calculados, com o auxílio do programa “STABL for Windows” (Purdue University, 2000), pelo método de Bishop Simplificado, admitindo-se superfícies de ruptura circulares. Nas simulações de escavações de  $H=5\text{m}$  e  $H=10\text{m}$ , para a geometria definida pela Figura 85, os valores de FS justificam a execução das contenções com solo grampeado (Tabela 29). Em ambas as análises, a coesão do solo ( $c'$ ) foi reduzida para  $20\text{kPa}$ . Esta redução foi realizada para simular uma condição desfavorável de chuvas intensas quando a sucção e, conseqüentemente, a coesão pode reduzir consideravelmente.

Tabela 29 - Fatores de segurança do talude da escavação em solo residual

Altura da escavação (H)	Fator de segurança (Bishop Simplificado)
5m	1,12
10m	0,69

#### 4.5. Análises

Após a consolidação da malha (aplicação de forças gravitacionais nos elementos), mudam-se às condições de contorno e dá-se início ao procedimento de escavação. O estudo foi definido para duas situações: taludes de baixa altura (H=5m) e taludes de alturas elevadas (H=10m).

A inclinação dos grampos com a horizontal ( $\alpha$ ) foi da ordem de  $10^\circ$ . A simulação dos mesmos foi feita por elementos unidimensionais, que trabalham por tração, não apresentando resistência à flexão. Em todas as análises realizadas, os grampos foram considerados livres ( $G_R$ -Livre) por fornecerem maiores valores de deslocamentos (Springer, 2001). A parede foi representada por elementos de viga, que apresentam resistência à flexão.

Os parâmetros geomecânicos empregados em todas as análises estão explícitos na Tabela 30.

Tabela 30 - Propriedades geomecânicas.

Grampo				Parede		Solo						
$\sigma_{aço}$	$E_{aço}$	$G_{injeção}$	$q_s$	$E_{parede}$	$h_{parede}$	$E_{solo}$	$\nu$	$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$\psi$	$k_0$
MPa	MPa	GPa	kPa	GPa	cm	MPa		KN/m <sup>3</sup>	kPa	graus	graus	
500	205	9,0	150	24	10	72	0,15	18	20	20	0	0,55

$\sigma_{aço}$ =tensão de escoamento do aço,  $E$ =módulo de Young,  $G$ =módulo cisalhante,  $q_s$ =resistência ao arrancamento do grampo,  $h_{parede}$ =espessura da parede,  $\nu$ =coeficiente de Poisson,  $\gamma$ =peso específico natural,  $c'$ =coesão efetiva,  $\phi'$ =ângulo de atrito,  $\psi$ =ângulo de dilatação,  $k_0$ =coeficiente de empuxo no repouso.

Com base nas características das obras em solo grampeado, revisadas no Capítulo II, a Tabela 31 apresenta os parâmetros empregados nas análises. Em todos os casos estudados, foram variados o espaçamento horizontal ( $S_h$ ) e vertical ( $S_v$ ), entre grampos, além do comprimento total dos grampos ( $L$ ).

A Tabela 32 mostra os resultados de deslocamentos horizontais no topo ( $\delta_t$ ) e na base ( $\delta_b$ ), na face da escavação. Nesta tabela também apresentam-se o ângulo médio de rotação ( $\theta$ ) da face da escavação, definido pela equação (21).

$$q = \arctg \left[ \frac{(d_t - d_b)}{H} \right] \quad \text{eq.(21)}$$

Os valores positivos de deslocamentos indicam uma movimentação da parede para dentro da escavação (Figura 86).

Tabela 31 - Parâmetros empregados nas análises

Parâmetro geométrico	Altura final da escavação (H)	
	5m	10m
Espaçamento horizontal (Sh) e vertical (Sv) entre os grampos	1,0m 1,5m 2,0m 3,0m 4,0m	1,0m 1,5m 2,0m 3,0m
Comprimento dos grampos (L)	3,5m 4,0m 6,0m 12,0m	6,0m 12,0m
Altura correspondente a cada etapa de escavação ( $H_{escav.}$ )	1,0m 1,5m 2,0m 3,0m 4,0m	
Diâmetro do grampo ( $\phi_{aço}$ )	25mm	
Diâmetro do furo ( $\phi_{furo}$ )	100mm	

O sinal positivo do ângulo  $\theta$  indica uma rotação no sentido horário conforme mostra a Figura 86.

Tabela 32 - Comportamento da face de escavação

H (m)	L (m)	Sv (m)	Sv/L (%)	$d_t$ (mm)	$d_b$ (mm)	$q$ (graus)	$d_t$ (%H)
5	4	1,0	25	7,0011	3,152	0,0441	0,140
5	4	1,5	38	6,968	2,824	0,0474	0,139
5	4	2,0	50	7,008	3,013	0,0457	0,140
5	3,5	1,0	29	6,96	3,19	0,0432	0,139
5	3,5	1,5	43	6,967	2,822	0,0474	0,139
5	6	1,5	25	7,016	2,857	0,0476	0,140
5	6	2,0	33	7,038	3,017	0,0460	0,141
5	12	3,0	25	6,961	2,759	0,0481	0,139
5	12	4,0	33	7,028	2,677	0,0498	0,141
10	6	1,0	17	3,356	-1,942	0,0303	0,034
10	6	1,5	25	2,751	-4,866	0,0436	0,028
10	6	2,0	33	-119,7	-145,3	-0,146	-1,197
10	12	1,0	8	5,016	-1,26	0,0359	0,050
10	12	1,5	13	4,443	-4,12	0,0490	0,044
10	12	2,0	17	3,204	-7,521	0,061	0,032
10	12	3,0	25	-13,2	-67,45	-0,310	-0,132

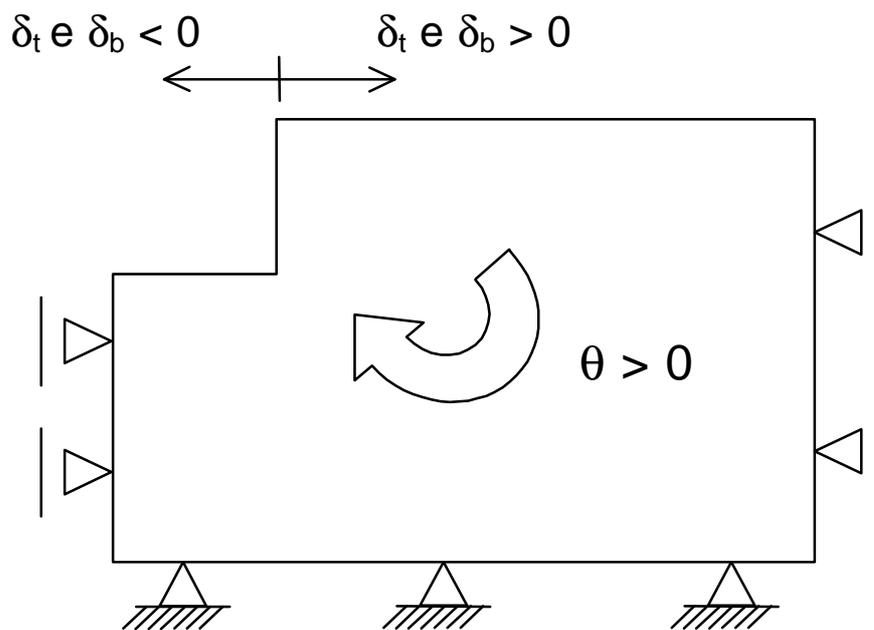


Figura 86 - Convenção de sinais empregada nos estudos realizados

Para escavações com  $H=5\text{m}$ , os deslocamentos horizontais no topo e base são positivos, indicando uma movimentação contrária à região escavada ( $\theta$  positivo). A Figura 87 mostra um perfil típico dos deslocamentos horizontais no topo da escavação. Este comportamento da parede pode ser atribuído a 3 fatores: i) influência das condições de contorno na proximidade da escavação; ii) rigidez do conjunto solo-grampo; iii) rigidez da parede. Quando a largura da base ( $B_e$ , Figura 85) é pequena ( $B_e < H$ ), os resultados numéricos mostram um perfil de deslocamento o qual seria esperado para este tipo de estrutura; isto é, maiores deslocamentos horizontais ocorrendo no topo e parede movendo-se na direção da escavação. Quando a largura da base da escavação é grande, a restrição dos deslocamentos horizontais imposta pelo contorno lateral na base está muito afastada da região escavada.

Face a estas condições, observa-se uma rotação global, no sentido horário, de toda massa de solo envolvendo a região reforçada. Esta movimentação se acentua com o aumento da profundidade de escavação. Nas análises com escavações de 10m, o deslocamento no topo é positivo enquanto que o da base é negativo, caracterizando claramente uma rotação do bloco solo-grampo. A distância da base da escavação ao limite inferior da malha ( $D$ , Figura 85) tem influência semelhante. Acredita-se, ainda, que a rigidez da parede também contribua para o comportamento do conjunto solo-grampo como um monolito.

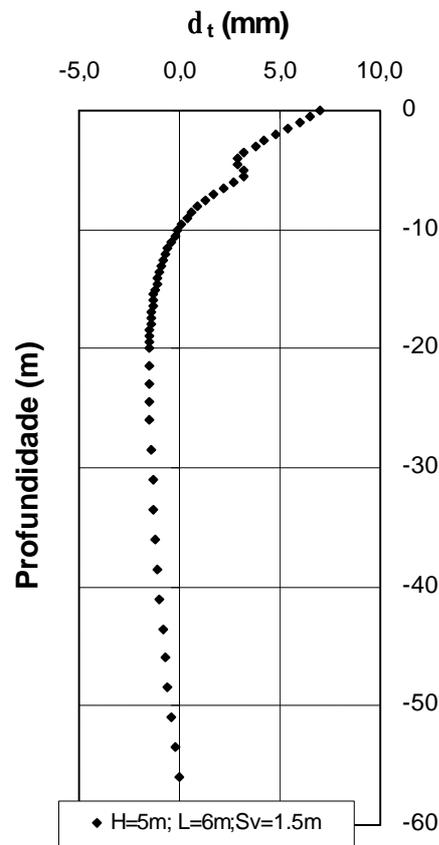


Figura 87 - Movimentação da massa reforçada contrária à região escavada

No caso de escavações de 5m de profundidade, os resultados de deslocamento no topo, mostrados na Figura 88, indicam que para  $L/H \geq 0,7$  não há interferência da densidade de grampos na escavação. Ressalta-se, ainda, que nestas análises, a relação entre espaçamento e comprimento de grampo ( $Sv/L$ ) variou entre 25% e 50%, ultrapassando o valor máximo de  $Sv/L=25\%$ , recomendado por Gerscovich et al. (2002).

Já para escavações de 10m de profundidade (Figura 89), os deslocamentos no topo, relativos à condição de  $L/H \geq 0,7$  ( $L=12m$ ), indicam interferência do espaçamento entre grampos quando este é superior a 2m ( $Sv/L > 16,7\%$ ). Para espaçamentos de 3m ( $Sv/L=25\%$ ) observa-se um incremento nos deslocamentos de 16mm (0,16% $H$ ), associado a uma mudança no padrão de deslocamentos horizontais. Nesta configuração, a parede passa a se deslocar em direção à escavação. A magnitude final deste deslocamento (igual a -13,2mm) é relativamente baixa e inferior ao limite de 0,3% relatado na literatura. No entanto, deve-se enfatizar que a modelagem numérica implica numa pré-definição de condições geométricas (contorno, discretização da malha)

que afetam diretamente o valor final dos deslocamentos. Espaçamentos maiores que 3m resultaram no colapso da estrutura.

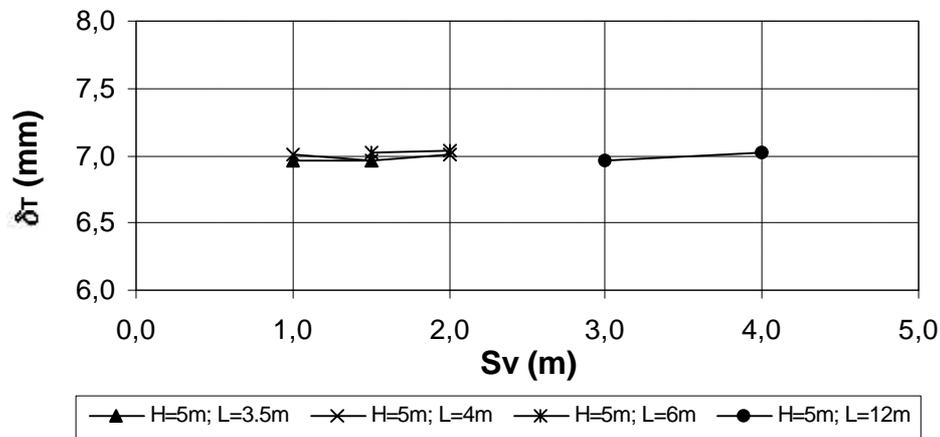


Figura 88 - Deslocamento horizontal em função de Sv (H=5m)

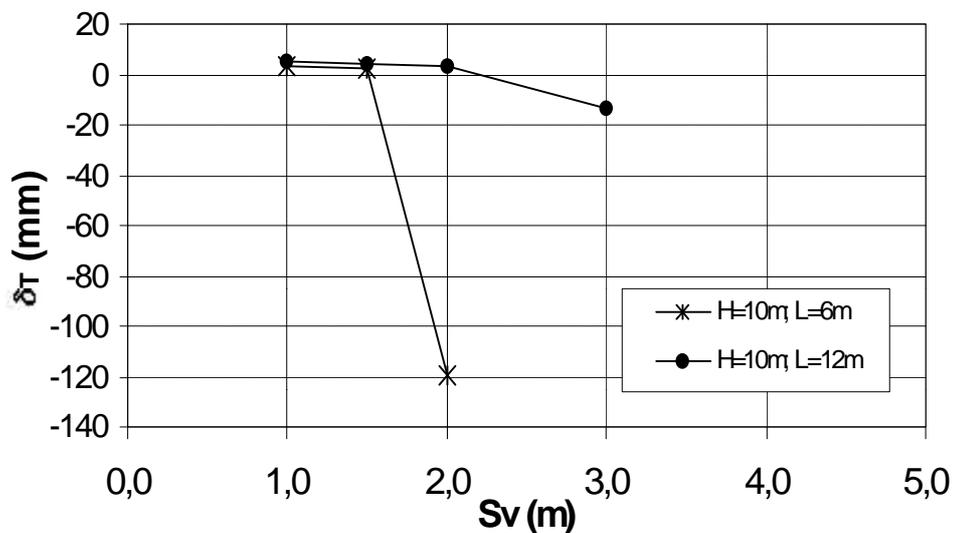


Figura 89 - Deslocamento horizontal em função de Sv (H=10m)

Ainda na Figura 89, para grampos de 6m de comprimento (H=10m, L/H < 0,7) a influência do espaçamento é observada quando este é superior a 1,5m (Sv/L > 25%). A partir desta condição, Sv=2m, ocorre o desenvolvimento de uma região de plastificação contínua, caracterizando uma condição de ruptura.

Na Figura 90, estão apresentados os ângulos médios de rotação ( $\theta$ ) da face da escavação para todos os casos analisados. Nesta figura, estão também

plotados os limites de ângulos de rotação associados aos deslocamentos horizontais no topo iguais a  $0,1\%H$  e  $0,3\%H$ . Com exceção de dois resultados correspondentes a  $H=10m$ , o ângulo de rotação se mostrou independente das condições geométricas ( $H$ ,  $S_v$ ,  $L$ ,  $H_{escav}$ ) e apresentou um valor equivalente a um deslocamento horizontal de  $0,1\%H$  no topo. Ressalta-se que este valor não deve ser interpretado como representativo do deslocamento horizontal previsto no topo, já que a base da parede também se desloca. Na Tabela 32 estão apresentados os valores de deslocamento horizontal no topo, calculados em função da altura da escavação, os quais são da ordem de  $0,15\%H$  ( $H=5m$ ) e  $0,04\%H$  ( $H=10m$ ).

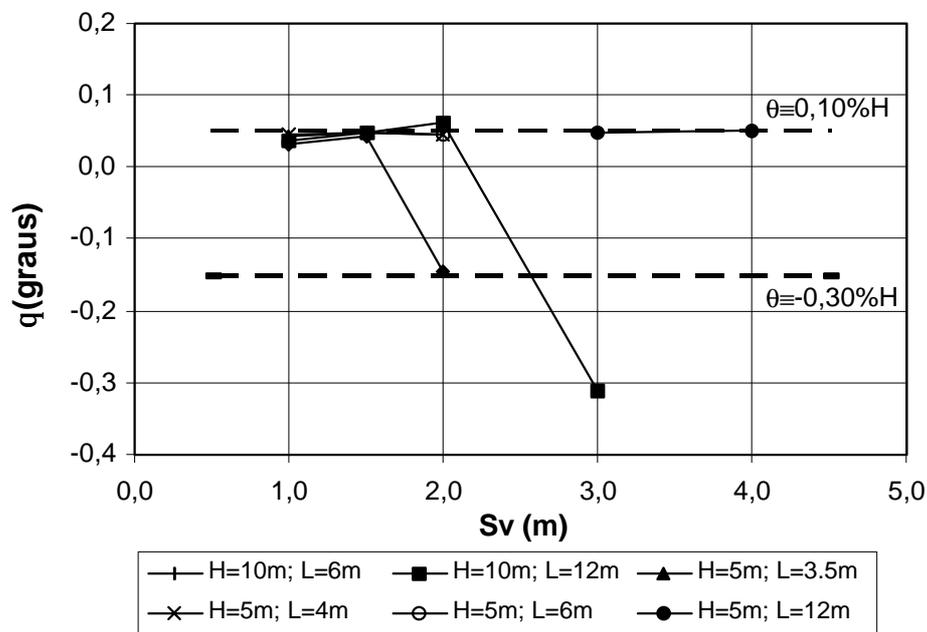


Figura 90 - Ângulos de rotação da face da escavação para todos os casos analisados

Ainda na Figura 90, dois pontos se destacam nos resultados para altura de escavação de 10m:  $L=6m$  e  $S_v=2,0m$ ;  $L=12m$  e  $S_v=3,0m$ . Estes pontos mostram rotação significativa da parede na direção da escavação. No caso de  $H=10m$ ,  $L=12m$  e  $S_v=3,0m$ , a rotação de  $0,31^\circ$  corresponde a um deslocamento no topo de  $0,54\%H$  (54mm), enquanto que o valor estimado foi de somente  $0,13\%H$  (Tabela 32). Esta diferença, já atribuída à rotação global do conjunto solo-grampo, não deve ser ignorada quando se avalia a deformabilidade de estruturas grampeadas. Na prática, as análises concentram-se nos deslocamentos no topo, admitindo que a rotação da parede ocorra com deslocamento nulo no pé ( $\delta_b=0$ ).

#### 4.5.1. Comprimento de grampo variável

Estudos adicionais foram feitos para avaliar a influência da utilização de grampos de comprimento variável no deslocamento da parede. As análises foram feitas considerando grampos de 12m de comprimento no trecho inicial de escavação, seguidos de grampos de 6m. Os resultados, apresentados na Tabela 33, mostram o deslocamento horizontal no topo calculado para uma escavação de 10m, para espaçamentos de 1,0 e 1,5m. Observa-se que, no caso de grampos de L=12m, a utilização de uma configuração variável não causa praticamente nenhuma alteração nos deslocamentos da parede.

Tabela 33 - Comportamento da face de escavação para valores de L fixo ou variável

<b>Sv (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>d<sub>t</sub> (%H)</b>	<b>d<sub>b</sub> (%H)</b>	<b>q (graus)</b>	<b>Configuração</b>
1,0	6	0,07	0,03	0,03	10 grampos de 6m
1,0	var.	0,05	0,03	0,04	5 grampos de 12m/ 5 grampos de 6m
1,0	12	0,05	0,03	0,04	10 grampos de 12m
1,5	6	0,03	0,05	0,04	10 grampos de 6m
1,5	var.	0,05	0,06	0,06	4 grampos de 12m/ 3 grampos de 6m
1,5	12	0,05	0,04	0,05	10 grampos de 12m

A adoção de uma configuração variável de comprimento de grampo, apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente recomendada e já tem sido utilizada em alguns casos. Dado ao caráter preliminar do estudo ora apresentado, recomenda-se que outras configurações de grampo, geometria de escavação e materiais sejam avaliadas com mais detalhes.