

7 Simulações Numéricas

O dimensionamento de estruturas de contenção de encostas é geralmente executado com base em métodos de equilíbrio limite e na experiência acumulada com as obras já executadas. No entanto, os métodos de equilíbrio limite consideram apenas os valores de resistência mobilizada ou de fatores de segurança e não permitem a determinação das deformações. Dessa forma, avaliar a deformabilidade do muro levando em conta a influência da seqüência executiva, o tipo de solo e a geometria da escavação requer o uso de uma ferramenta computacional mais eficiente.

Cardoso (1987) afirma que a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) na análise das estruturas de contenção permite o estudo detalhado das deformações do maciço terroso bem como da importância relativa dos principais fatores.

O objetivo das análises numéricas é reproduzir de forma computacional o comportamento observado no campo. A simulação computacional deve reproduzir da forma mais satisfatória possível os deslocamentos observados no campo. A geometria do problema e os as propriedades dos materiais são fundamentais para uma adequada simulação computacional.

7.1. Características de Projeto

Gerscovich et al. (2005) destacam que, na maioria das obras, a técnica de estabilização de encostas com solo grampeado envolve a seguinte seqüência de etapas: escavação, perfuração do furo, colocação das barras no furo, injeção de nata de cimento e execução da face. Esta é feita normalmente com um revestimento delgado de concreto projetado, sem função estrutural, com o objetivo de proteger o talude quanto a ocorrência localizada de erosão superficial, causada principalmente pela ação da chuva e outras intempéries naturais.

Em taludes naturais, pode-se executar o reforço sem a etapa de escavação. Alternativa pouco comum é a simples cravação do grampo, sem perfuração e injeção. O desconfinamento lateral gerado pela escavação mobiliza

a resistência no contato solo-grampo. Como as inclusões trabalham basicamente à tração, quanto maior for o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do reforço.

Existem diversas alternativas de conexão da extremidade externa do grampo à face de concreto projetado. A Figura 193 mostra diferentes alternativas de execução do grampo. Dependendo da opção escolhida, esta conexão pode ser considerada rígida o suficiente para garantir a compatibilidade dos deslocamentos ou livre, possibilitando o deslocamento relativo muro-grampo (Springer et al., 2001).

De um modo geral, os parâmetros relativos ao projeto de grampos são: comprimento (L), ângulo de inclinação (α), espaçamentos vertical (S_v) e espaçamento horizontal (S_h).

A técnica de dimensionamento baseia-se em metodologias de equilíbrio limite, em que fatores de segurança são relacionados a superfícies de ruptura pré-estabelecidas. O dimensionamento da estrutura reforçada depende, portanto, da magnitude dos parâmetros de resistência do solo e da resistência ao arrancamento no contato solo/grampo (q_s), além de variáveis ambientais que eventualmente podem alterar as características mecânicas do grampo (Gerscovich et al., 2005).

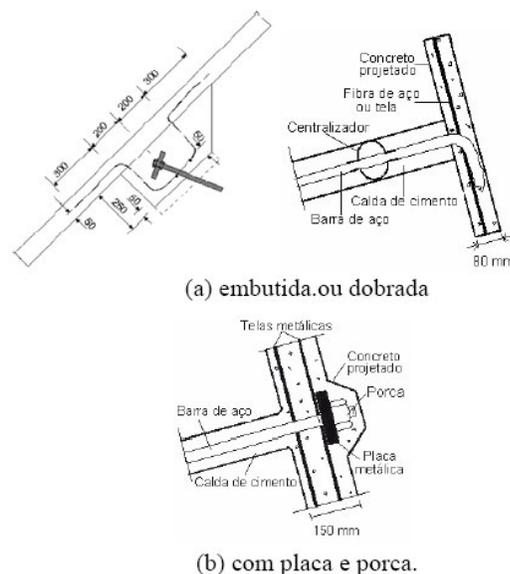


Figura 193 – Tipos de Fixação de Extremidades de Grampos (Georio, 1999)

Não há, entretanto, uma metodologia unanimemente aceita por projetistas. Diferentes enfoques conceituais quanto ao mecanismo de ruptura do conjunto

solo-grampo, assim como quanto à forma da superfície potencial de ruptura e natureza das forças atuantes, têm sido apresentados em vários trabalhos publicados na literatura (Stocker et al., 1979; Shen et al., 1981; Schlosser, 1983; Juran et al., 1988; Bridle, 1989; Anthoine, 1990).

Gerscovich et al. (2005) sugerem que, para paramentos verticais, o comprimento médio dos grampos instalados em pré-furo tem variado entre $0,8H$ a $1,2H$ (H = altura total da escavação), com densidade aproximada de um grampo por $2,5$ a 6m^2 de face e com inclinação (α) com a horizontal entre 5 a 20° . Para a obra estudada, o comprimento de grampo variou de $0,14H$, para o talude superior, até $2,80H$ para o talude inferior. Essa diferença marcante é atribuída à concepção diferenciada de projeto, na qual os grampos funcionam como elementos de aumento de rigidez no maciço. A densidade e a inclinação dos grampos estão dentro dos limites apresentados anteriormente.

7.2. Equilíbrio Limite

As análises por equilíbrio limite foram realizadas para as diferentes etapas de escavação da obra. Essas análises foram realizadas com o objetivo de se avaliar a condição de segurança do talude durante a construção e após a conclusão dos serviços. A determinação do fator de segurança global (FS) utilizou o método de Bishop com o auxílio do programa computacional Geoslope (Krahn, 2001).

Para estas análises foram empregados parâmetros representativos das camadas de solo residual definidos por Geoprojetos (2004) e também a partir de ensaios de laboratório (Capítulo 04). Foram também considerados valores de resistência ao arrancamento estimados em correlações com o índice N_{spt} e obtidos por meio de ensaios de arrancamento no campo (Proto Silva, 2005).

Além disso, foi considerada a geometria de acordo com a evolução da escavação, com e sem elementos resistentes (grampos). A Tabela 46 resume as três hipóteses de análise realizadas.

Os valores de FS obtidos para cada uma das hipóteses serão comparados entre si. Além disso, será avaliado a evolução do fator de segurança em função das etapas de escavação da obra.

Tabela 46 - Condições utilizadas para cada uma das hipóteses das análises de equilíbrio limite.

<i>Hipótese</i>	<i>Condição da Estratigrafia</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Elementos de Estabilização</i>
01	Solo Homogêneo	Geoprojetos (2004)	Não existentes
02	Solo Homogêneo	Geoprojetos (2004)	Grampos com q_s variável (correlação com N_{SPT})
03	Solo Residual Maduro e Solo Residual Jovem	Capítulo 04 (Ensaio de Laboratório)	Grampos com q_s variável (ensaio de arrancamento)

7.2.1. Hipótese 01 – Solo Homogêneo não grampeado

A Figura 194 mostra a geometria utilizada para a simulação de escavação de uma encosta homogênea com as mesmas fases de escavação verificadas durante os serviços na obra Museu II. Os parâmetros utilizados para a análise de equilíbrio limite foram os definidos por Geoprojetos (2004) na Tabela 47.

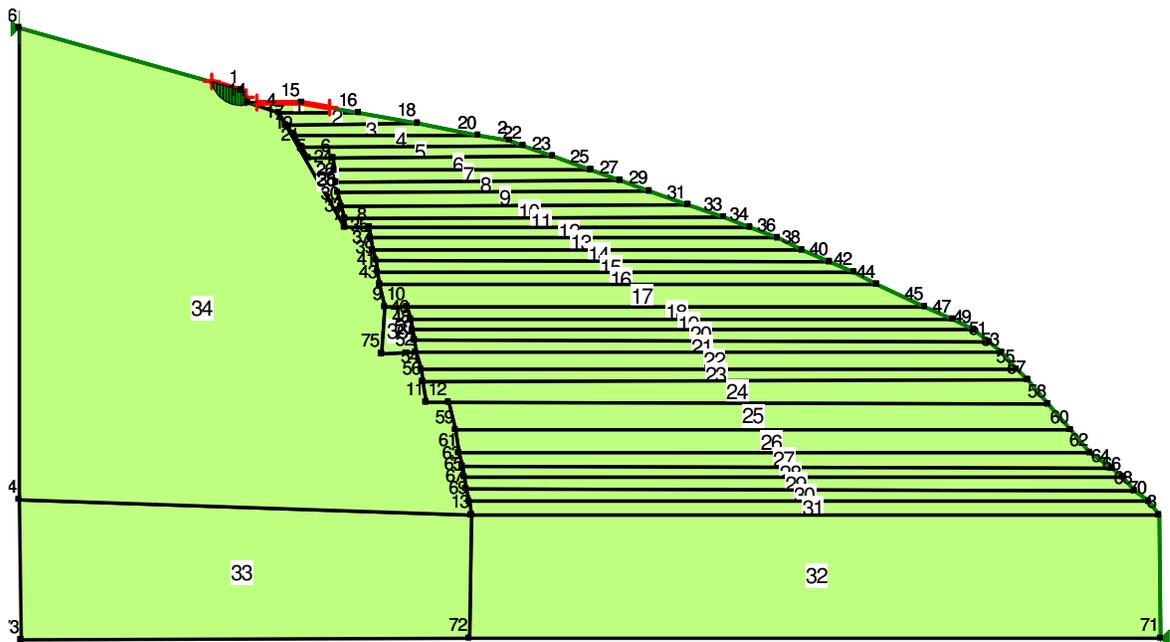


Figura 194 - Hipótese 01 – Geometria da escavação não grampeada em solo homogêneo

Tabela 47 - Parâmetros do solo utilizados na hipótese 01

-	<i>Solo Residual Maduro</i>
γ_{nat} (kN/m ³)	17,5
c (kPa)	25,0
ϕ	29°

A análise com a Hipótese 1 serve de base para estimar o percentual de aumento de fator de segurança com a inclusão dos grampos na encosta. Os resultados indicam para a Hipótese 01 que, sem o reforço dos grampos ocorreria o colapso da escavação, de acordo com as condições de equilíbrio limite. A ruptura aconteceria quando a escavação tivesse altura de 22m, o que representa aproximadamente 60% da escavação total prevista. A Figura 195 mostra o resultado obtido por meio do programa Geoslope. O fator de segurança (FS) no decorrer da simulação da hipótese 01 variou de 3,5 até a condição representativa de ruptura correspondente a 0,9.

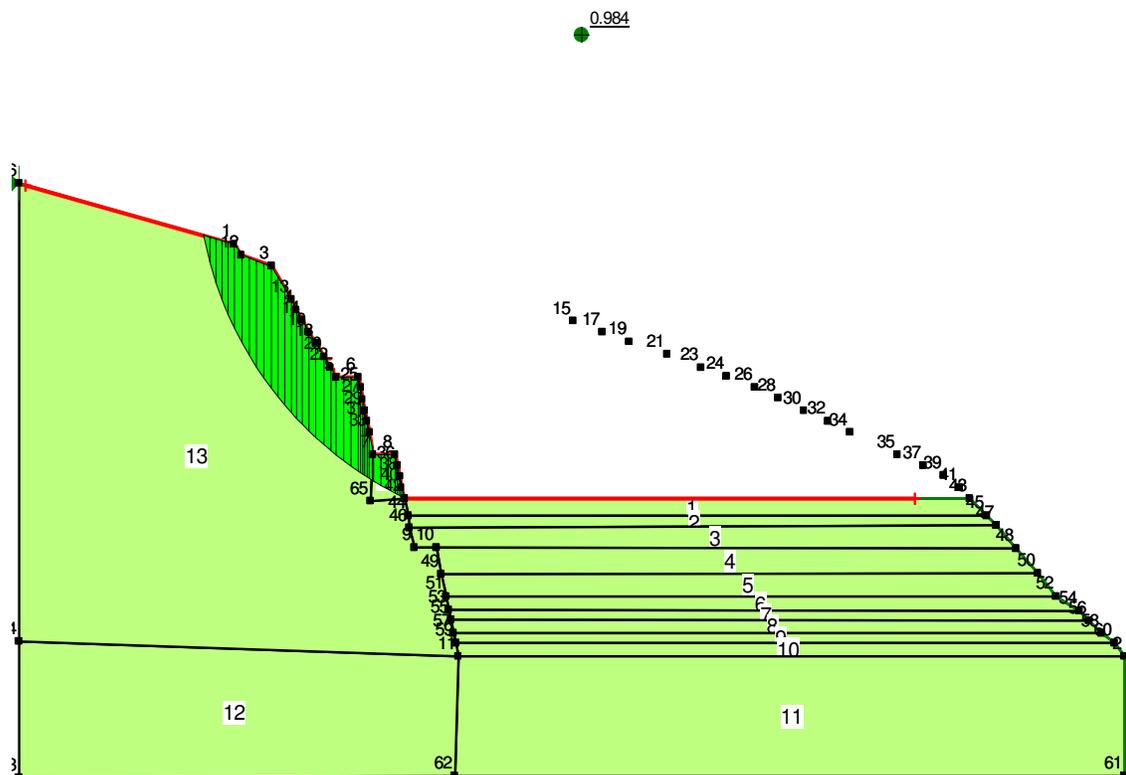


Figura 195 – Resultado correspondente a condição de ruptura para a hipótese 01.

7.2.2.Hipótese 02 – Solo Homogêneo grampeado

A hipótese 02 procurou reproduzir as condições de projeto estabelecidas por Geoprojetos (2004). Tal como foi realizado para a hipótese 01, a geometria da escavação seguiu as etapas observadas em campo durante os serviços de estabilização da encosta.

Os parâmetros geomecânicos considerados para esta hipótese estão mostrados na Tabela 48.

Tabela 48 - Parâmetros Geomecânicos utilizados na hipótese 02

<i>Solo</i> Residual Maduro		<i>Grampos</i>	
γ_{nat} (kN/m ³)	17,5	α (inclinação)	11°
c (kPa)	25,0	ϕ_{grampo} (diâmetro do grampo)	0,076m
ϕ	29°	ϕ_{barra} (diâmetro da barra)	0,022m
		q_s (resistência ao arrancamento)	160 kPa ($h_{esc} > 29m$)
		(Geoprojetos, 2004)	190 kPa ($22 < h_{esc} < 29m$)
			220 kPa ($h_{esc} < 22m$)
		S_h (espaçamento horizontal) x S_v (espaçamento vertical)	1,0m x 1,5m
		F_{esc} (Resistência a tração)	250 kN

A Figura 196 traz a geometria considerada para uma fase intermediária das simulações. É importante observar que os grampos foram inseridos na geometria à medida evoluía a escavação.

Geoprojetos (2004) utilizou para obra Museu II uma concepção de projeto diferente da obra Museu I, reportada por Lima (2007). A obra Museu I apresenta os maiores grampos localizados na porção superior do talude e o comprimento dos elementos é sensivelmente maior do que o utilizado para a obra Museu II. Os grampos para a obra Museu I atravessam a superfície de ruptura global do talude. Por outro lado a obra Museu II apresenta grampos maiores na porção inferior. O tipo de solicitação dos grampos para a superfície de ruptura crítica encontrada para a condição final da hipótese 02 sugere que o maciço grampeado se comporta de forma equivalente a um muro de peso.

A Figura 197 apresenta a superfície crítica encontrada para a hipótese 02. O fator de segurança (FS) no decorrer da simulação da hipótese 02 variou de 3,5 até a condição representativa crítica correspondente a 1,3.

Para a etapa correspondente à escavação da altura de 22m, o fator de segurança obtido foi de 1,5. Isto representa um aumento do fator de segurança de aproximadamente 50% em relação à hipótese 01, com base nas análises de equilíbrio limite.

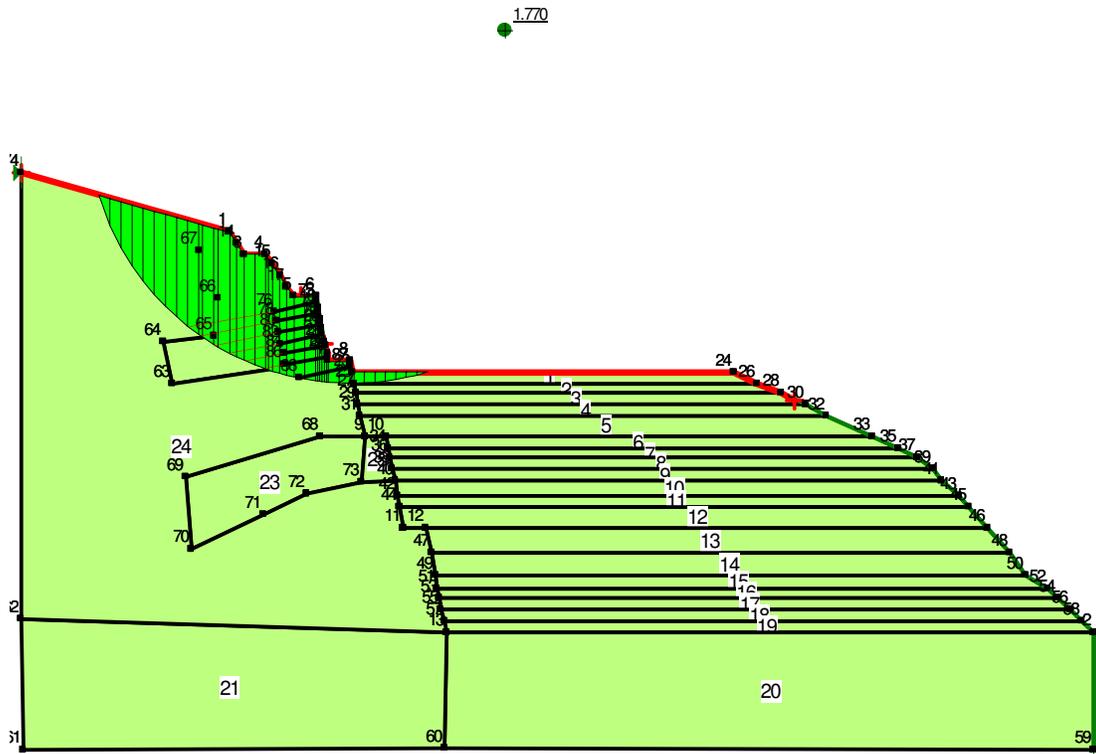


Figura 196 - Hipótese 02 – Geometria considerada e resultados para FS para a escavação grampeada em solo homogêneo (condição intermediária)

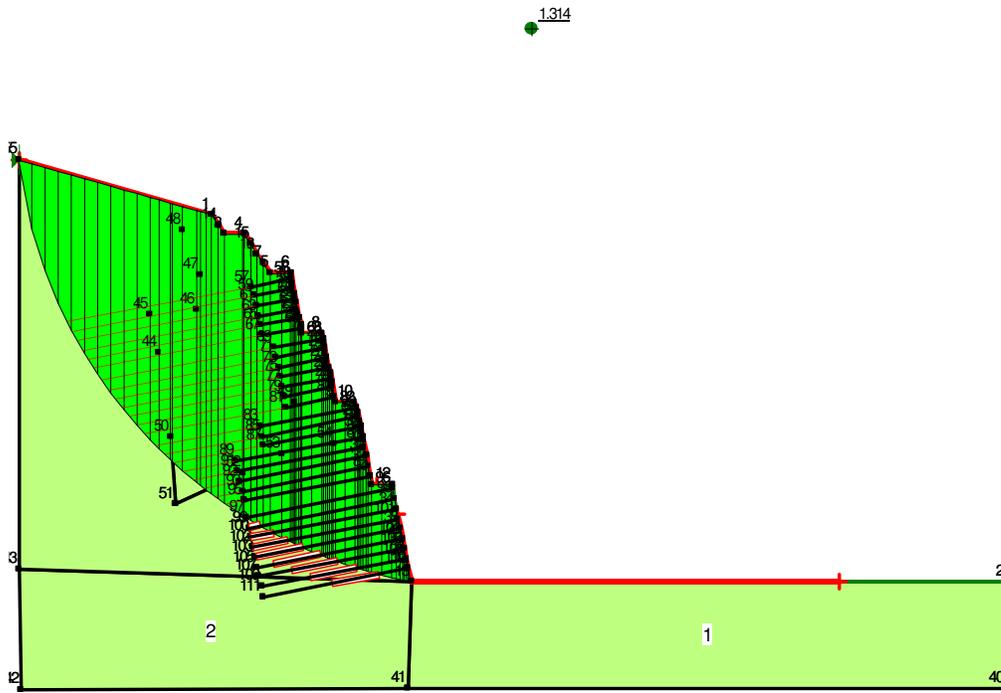


Figura 197 - Hipótese 02 – Geometria considerada e resultados para FS para a escavação grampeada em solo homogêneo (condição final de escavação)

7.2.3. Hipótese 03 – Escavação grampeada com duas camadas de solo

Esta hipótese reúne as informações obtidas durante as fases de investigação de campo e laboratório. As etapas de escavação estão simuladas de acordo com a geometria utilizada nas hipóteses anteriores. De um modo geral, os parâmetros geomecânicos admitidos para esta hipótese consideram as informações dos ensaios de laboratório (Capítulo 04), de ensaios de arrancamento reportados por Proto Silva (2005) e do modelo geológico tridimensional proposto por Gomes Silva (2006).

A Tabela 49 resume os diversos parâmetros geomecânicos utilizados para os diferentes solos e grampos introduzidos na encosta.

A Figura 198 mostra a superfície crítica para a etapa referente ao final da escavação. Nota-se que a superfície de ruptura se localiza na porção superior do talude. O tipo de concepção de projeto utilizado para a encosta considera a região localizada imediatamente atrás da face de escavação como sendo um grande bloco de solo reforçado. Isto é, os grampos inseridos na encosta funcionam como elementos de enrijecimento da massa de solo, sugerindo a equivalência com um muro de peso. Os grampos instalados na face servem para

prevenir superfícies de ruptura locais desenvolvidas na face de escavação. A distribuição dos grampos e o comprimento de cada um deles determinam a rigidez do muro de peso equivalente.

Tabela 49 - Parâmetros Geomecânicos utilizados na hipótese 03.

Perfil Estratigráfico (Capítulo 04)		Grampos	
Solo Residual Maduro		α (inclinação)	11°
Tipo de Solo	Argila Arenosa	ϕ_{grampo} (diâmetro do grampo)	0,076m
γ_{nat} (kN/m ³)	17,6	ϕ_{barra} (diâmetro da barra)	0,022m
c (kPa)	28,0	q_s (resistência ao arrancamento)	210 kPa ($h_{\text{esc}} > 36\text{m}$) 166 kPa ($29 < h_{\text{esc}} < 36\text{m}$) 227 kPa ($26 < h_{\text{esc}} < 29\text{m}$) 274 kPa ($20 < h_{\text{esc}} < 26\text{m}$) 260 kPa ($h_{\text{esc}} < 20\text{m}$)
ϕ	23°	(Proto Silva, 2005)	
Solo Residual Jovem			
Tipo de Solo	Areia Argilosa	S_h (espaçamento horizontal) x S_v (espaçamento vertical)	1,0m x 1,5m
γ_{nat} (kN/m ³)	18,2	F_{esc} (Carga de Escoamento do Aço)	250 kN
c (kPa)	59,0		
ϕ	30°		

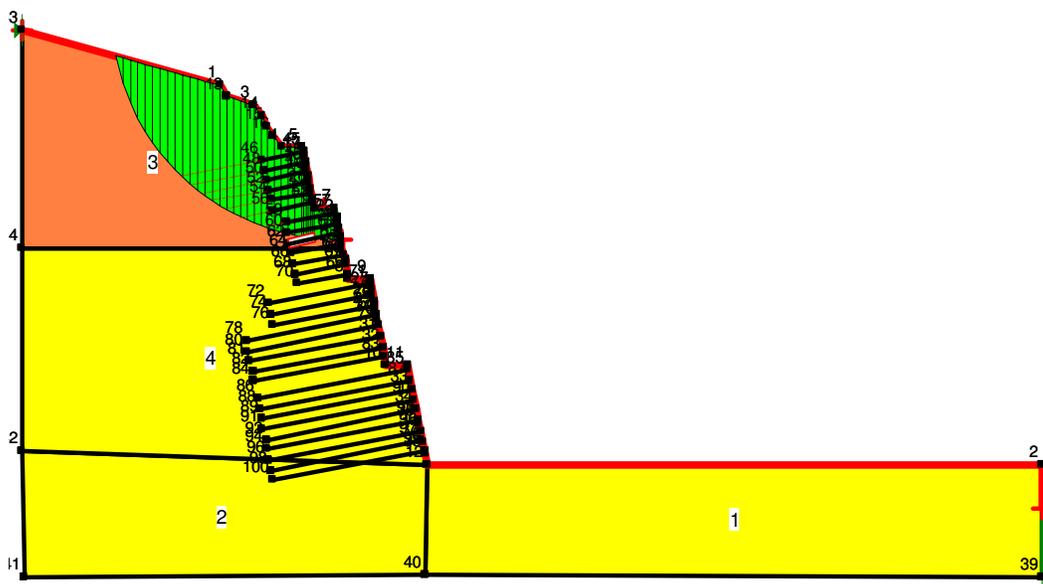


Figura 198 - Hipótese 03 – Geometria considerada e resultados de FS para a escavação grampeada em solo homogêneo (condição final de escavação)

Dessa forma, o comportamento da escavação grampeada deve ser analisado levando-se em consideração que a mesma se comporta como uma

estrutura de solo reforçado e não propriamente um solo grampeado. Os grampos instalados funcionam como elementos de reforço. Para a hipótese 03 o fator de segurança variou entre 3,0 e 1,5.

7.2.4.Comparação entre as hipóteses consideradas

As diversas hipóteses consideradas visam a comparação entre os condicionantes diferenciados de projeto assumidos. A Tabela 50 compara os valores de fatos de segurança obtidos para as diversas etapas de escavação da encosta.

A comparação entre as hipóteses 01 e 02 sugere que o não grampeamento da encosta levaria à ruptura da mesma, de acordo com os métodos de Equilíbrio Limite. O grampeamento da encosta é fundamental a partir da etapa 07 (cota de escavação de 41m). Até a etapa 07 não existia diferença entre os valores de FS, e as condições eram idênticas, uma vez que as condições de dimensionamento também são correspondentes. No entanto, após esta etapa, a hipótese 02 considera a execução de grampos na encosta. Deste ponto em diante, a hipótese 01 apresenta acentuada queda nos valores referência de segurança (FS), o que sugere a provável ruptura da encosta na etapa 22 (cota de escavação de 25m). Analogamente, a hipótese 02 mostra que, para a mesma etapa, o fator de segurança é de aproximadamente 1,5, o que corresponde a mais do que 50% do valor obtido para a primeira análise. O padrão de decréscimo do fator de segurança para a hipótese 02 pode ser considerado como constante. Para a condição final de escavação, o valor de FS é igual a 1,3.

Comparando-se as hipóteses 02 e 03, é possível identificar diferenças desde a primeira etapa. As duas hipóteses utilizam parâmetros diferenciados para solos e grampos. Os critérios de resistência para o solo da hipótese 03 são menores do que os critérios da hipótese 02. Dessa forma, a hipótese 03 oferece valores de FS inferiores aos da hipótese 02 no início do processo de escavação.

A hipótese 03 mostra valores de FS inferiores aos obtidos para a hipótese 02 até a etapa 12. Desta etapa em diante, os valores de FS da hipótese 03 são superiores aos da hipótese 02. Este fato pode ser explicado pela existência de uma segunda camada de solo, com valores de parâmetros de resistência superiores aos admitidos para o topo do talude.

É possível afirmar também que o aumento do valor da resistência de arrancamento para os grampos pouco influenciou no aumento dos fatores de

segurança para a encosta, fato já observado por Lima (2007). Os critérios de resistência desempenham papel mais importante na determinação do fator de segurança.

As visitas ao campo e os resultados de ensaios revelaram que o talude apresenta um perfil de intemperismo bem desenvolvido. Desse modo, é natural que solos localizados em horizontes inferiores possuam parâmetros de resistência superiores. Adicionalmente, as observações de campo realizadas indicaram a ocorrência de rocha alterada na base do talude.

A grande diversidade de materiais da encosta dificulta que as exatas condições de campo sejam retratadas em um modelo de simulação computacional. Além disso, os parâmetros foram obtidos somente para alguns materiais da encosta. Por estas razões, a simulação realizada deve ser considerada com bastante critério e lembrando-se que existem imprecisões quanto a geometria, distribuição de camadas, e parâmetros geomecânicos. A Figura 199 apresenta, de forma gráfica, a comparação dos fatores de segurança obtidos para as diferentes hipóteses consideradas.

Também foram realizadas análises considerando diferentes superfícies de ruptura, a partir dos dados de instrumentação disponíveis. Os resultados estão apresentados no item seguinte.

Lima (2007) comparou os diversos índices de projeto de obras internacionais com os índices obtidos em sua pesquisa. A Tabela 51 acrescenta ainda os dados obtidos para a obra Museu II.

Os índices obtidos estão de acordo com os reportados por Lima (2007). Comparando-se com as recomendações de Bruce e Jewel (1986 e 1987) é possível verificar que, com exceção do índice de resistência, os demais valores obtidos estão dentro das faixas propostas anteriormente.

Lima (2007) também comparou os valores típicos de projetos em estruturas de solo grampeado (Tabela 52). Os valores propostos por Clouterre (1991) referem-se a escavações verticais em solos homogêneos, o que justifica as diferenças existentes. Quando comparados com os dados de Lima (2007), os valores do Museu II são similares, com exceção do comprimento de grampos (L). A diferença de comprimento de grampos deve ser atribuída às diferenças nas concepções de projeto adotadas para as obras Museu I e Museu II.

Tabela 50 - Evolução do fator de segurança nas diferentes hipóteses em função da escavação

Etapa	Cota de Escavação (m)	No. de Grampos(*)	Hip. 01	Hip. 02	Hip. 03
1	47,0	-	3,53	3,53	3,02
2	46,0	-	3,10	3,10	2,78
3	45,5	-	3,09	3,09	2,62
4	44,0	-	3,01	3,01	2,54
5	43,0	-	2,83	2,83	2,51
6	42,0	-	2,75	2,75	2,48
7	41,0	1	2,08	2,55	2,37
8	40,0	2	1,85	2,46	2,31
9	39,0	3	1,71	2,41	2,29
10	37,8	4	1,57	2,36	2,26
11	36,8	5	1,48	2,28	2,20
12	36,0	6	1,41	1,98	2,14
13	35,0	7	1,41	1,77	2,11
14	34,0	8	1,39	1,69	2,07
15	33,0	9	1,31	1,63	2,06
16	32,0	10	1,23	1,57	2,02
17	30,5	11	1,16	1,56	1,96
18	29,0	13	1,05	1,55	1,95
19	28,0	14	1,05	1,54	1,96
20	27,0	15	1,04	1,53	1,92
21	26,0	16	1,02	1,52	1,94
22	25,0	17	0,98	1,52	1,92
23	23,5	18	-	1,51	1,92
24	22,5	19	-	1,50	1,92
25	20,6	21	-	1,47	1,88
26	18,2	23	-	1,42	1,86
27	16,2	25	-	1,42	1,84
28	15,0	27	-	1,47	1,76
29	13,9	28	-	1,41	1,69
30	12,5	29	-	1,42	1,57
31	10,9	30	-	1,33	1,53

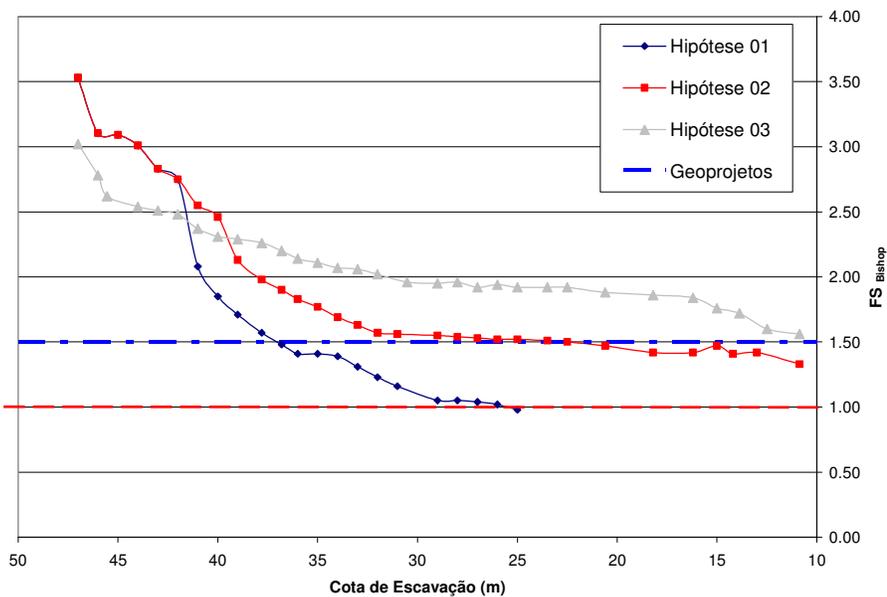


Figura 199 – Variação do fator de segurança com a escavação para as três hipóteses.

Tabela 51 - Comparação dos valores de índices característicos em obras de solo grampeados (injetados) (modificado de Lima, 2007)

Referência	Bruce e Jewell (1986 e 1987)	Barley (1993)	Museu I (Lima, 2007)	Museu II		
Tipo de Solo	Solos Granulares	-	-	Residual	Residual	
Índice de Comprimento	0,5 a 0,8	1,00	0,42	1,0	0,6	0,5
Índice de Contato	0,3 a 0,6	0,36	0,16	0,15	0,5 a 0,8	0,3 a 0,6
Índice de resistência	0,004 a 0,008	0,28	0,28	0,20	0,0012 a 0,0016	0,0014
Índice de desempenho	0,001 a 0,003	-	-	-	0,003	0,002

Índice de comprimento= L_{max}/H ; **Índice de contato (ou aderência)**= $(\phi_{furo} \cdot L)/Sv \cdot Sh$; **Índice de resistência**= $(\phi_{aço})^2/Sv \cdot Sh$; **Índice de desempenho**= δ_n^{max}/H

Tabela 52 - Comparação dos valores típicos de projetos em estruturas de solo grampeado (modificado de Lima, 2007)

Parâmetro	Clouterre (1991)	Lima (2007)	Museu II
Comprimento dos grampos (L)	0,8 a 1,2H	0,4 a 0,6H	0,1 a 0,4H
Número de grampos por m ² de paramento	0,15 a 0,40	0,25 a 0,32	0,30
Diâmetro dos grampos	20 a 25mm	22mm	22mm
Resistência à tração da barra de aço (T _G)	100 a 600 kN	247,8kN	250kN
Densidade do grampeamento (d)	0,13 a 0,60	0,07 a 0,21	0,20
Inclinação do grampo (α) com a horizontal	0° a 20°	10°	11°
Inclinação do paramento com a vertical (η)	0° a 10°	15° a 30°	11°
Inclinação da superfície do terreno (θ_t)	0° a 5°	5°	5°

7.2.5. Condição de Equilíbrio para Diversas Superfícies de Ruptura

Além das três hipóteses consideradas, o método do equilíbrio limite também foi utilizado para a avaliação das condições de segurança para superfícies de ruptura indicadas pela análise da instrumentação disponível.

Foram utilizados os dados de dois inclinômetros instalados na encosta, 05 caixas de "tell-tales", em diferentes cotas do terreno, contendo no total 15 instrumentos e dez grampos instrumentados em cinco cotas diferentes da encosta. Os dados dos inclinômetros referem-se as cotas onde é verificado um início de movimentação. Para os "tell-tales" foi localizada a região de maiores deslocamentos para cada uma das caixas instaladas. Por outro lado, a região potencial foi definida em função do ponto de carga máxima de ruptura nos

grampos instrumentados. O resultado pode ser visto na Figura 200, onde estão representadas as três superfícies (ou regiões) potenciais de rupturas consideradas.

A determinação do fator de segurança, na condição final de escavação, também foi obtida em análise com o programa Geoslope (Krahn, 2001). Os resultados encontram-se na Tabela 53.

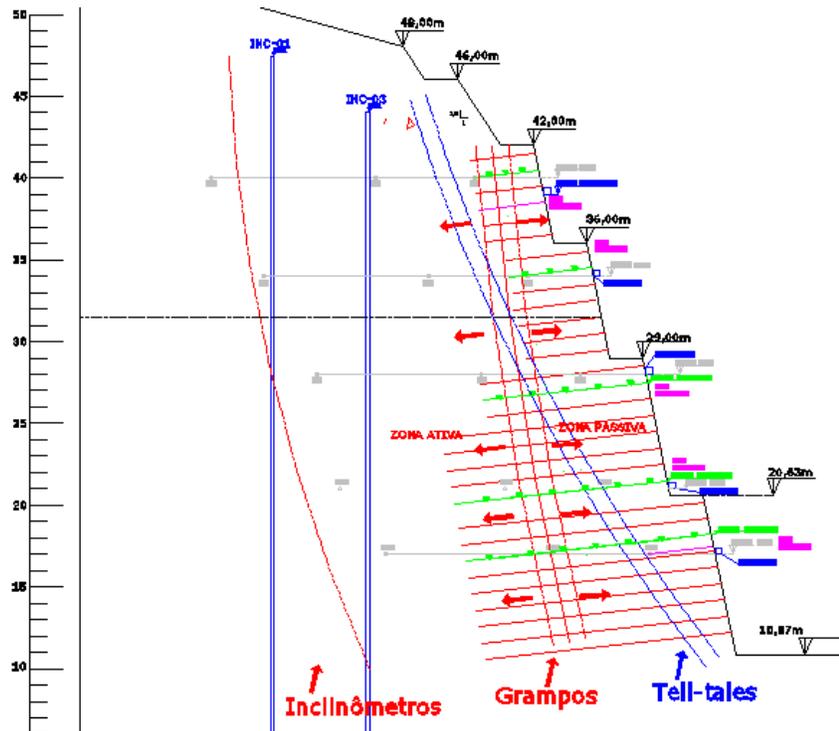


Figura 200 - Localização assumida para as superfícies de maiores deslocamentos obtidas por meio de instrumentação (inclinômetros e tell tales).

Tabela 53 - Fatores de Segurança nas superfícies indicadas pela instrumentação.

<i>Instrumento Referência</i>	<i>Fator de Segurança (FS)</i>
"Tell-Tales"	1,69
Inclinômetros	1,78
Grampos Instrumentados	1,96

Os valores de FS obtidos para estas superfícies são maiores do que o fator de segurança encontrado para a condição final de escavação nas hipóteses 02 e 03. Desse modo, é possível afirmar que existem superfícies de rupturas locais com fator de segurança inferior ao global da estrutura. Para este caso, os grampos desta região funcionam como os elementos de estabilização.

É possível também supor que apenas alguns grampos possuem contribuição na estabilidade das superfícies obtidas por meio da análise dos grampos instrumentados e *tell-tales*. A superfície potencial de ruptura indicada pelas leituras inclinométricas demonstra que os grampos para este caso não funcionam como elementos de resistência ao deslizamento da encosta. Logo, é possível afirmar que os grampos funcionam como elementos de enrijecimento da encosta, com a sua estrutura grampeada equivalendo a um muro de peso.

7.3.Simulação de Escavação (Método dos Elementos Finitos)

Vários autores têm empregado técnicas numéricas em estudos paramétricos de obras de solo grampeado (Ehrlich et al., 1996; Cardoso e Gonçalves, 1997; Springer et al., 2001; Gerscovich et al., 2002; Lima et al., 2002, 2003; 2004).

Estudos comparativos entre resultados de modelagem numérica e instrumentação de campo também têm sido realizados. Em alguns casos observou-se razoável concordância entre os valores medidos no campo e os previstos numericamente (Cardoso e Carreto, 1989; Unterreiner et al., 1995).

Alguns autores demonstraram a grande influência do tipo de tratamento numérico utilizado para representar não só os elementos presentes no modelo (Caliendo et al., 1995), mas também a influência das condições de contorno (geometria da malha) em análises tensão-deformação de estruturas grampeadas (Briaud e Lim, 1997).

Gerscovich et al. (2005) apresentam uma comparação do comportamento tensão-deformação de taludes em solo grampeado, previsto pelo programa computacional FLAC (método das diferenças finitas) com o previsto pelo programa computacional PLAXIS (método dos elementos finitos).

7.4.Programa Utilizado (PLAXIS)

O estudo abordou a modelagem numérica da escavação do talude, em diferentes estágios, com face sub-vertical, estabilizada com grampos injetados. O programa PLAXIS permite que as diferentes fases de escavação sejam simuladas de forma bastante simplificada.

De acordo com Brinkgreve e Vermeer (1998) o programa de elementos finitos, PLAXIS, foi desenvolvido para análises de problemas bidimensionais. O programa dispõe de pré e pós-processadores. Em análises bidimensionais,

podem ser adotados elementos triangulares de 6 ou 15 nós. As simulações podem ser realizadas considerando-se deformação plana ou comportamento axisimétrico. Na versão utilizada no presente trabalho (versão 8.2), não há limitação quanto ao número de elementos. O PLAXIS possui cinco modelos constitutivos para representação de relações tensão-deformação lineares ou não-lineares.

O programa não possui elemento específico para representar o grampo. No entanto, alguns elementos estruturais podem ser utilizados; como por exemplo, elementos de barra ou geotêxteis. Waterman (2007) e Ortigão (2007) recomendam a utilização de elementos estruturais do tipo Geotêxtil. Gerscovich et al. (2005) comparou a utilização de elementos tipo barra e geotêxtil e concluiu que para a simulação de grampos o elemento de geotêxtil é mais adequado.

7.4.1. Geometria e Aspectos de Modelagem

A análise numérica considerou a escavação realizada na obra Museu 2, com a consideração de nível d'água profundo. A Figura 201 apresenta a geometria utilizada pelo programa, os diferentes solos considerados, a face de concreto projetado, os grampos considerados e as diversas fases de escavação.

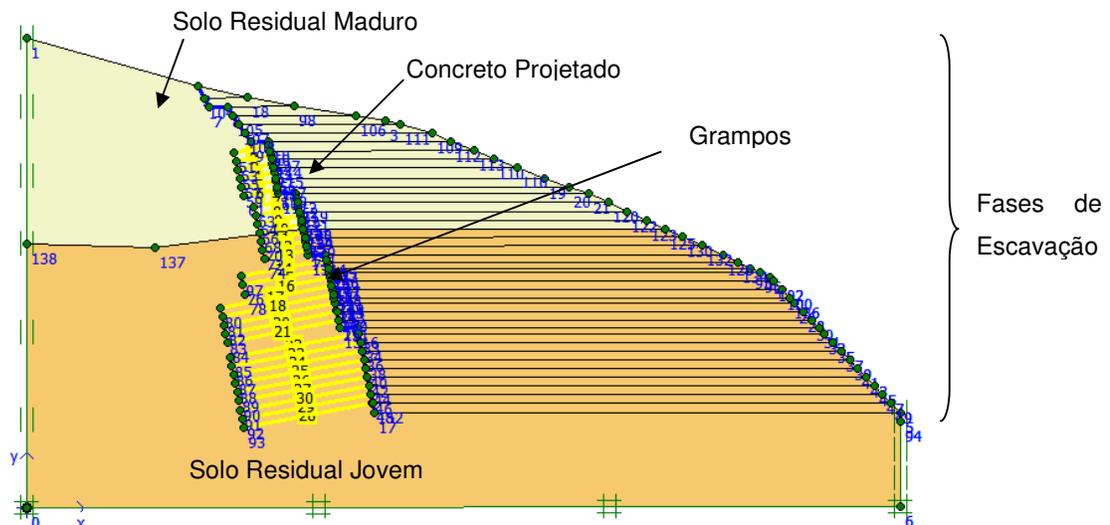


Figura 201 - Geometria e aspectos utilizados na simulação com o programa Plaxis.

As simulações foram realizadas considerando-se dois materiais (solo residual maduro e solo residual jovem), os grampos e uma face delgada de concreto projetado. O programa gera uma malha de elementos finitos que foi refinada para a região onde estavam inseridos os grampos da encosta (Figura

202). As condições de contorno utilizadas também estão apresentadas na figura seguinte.

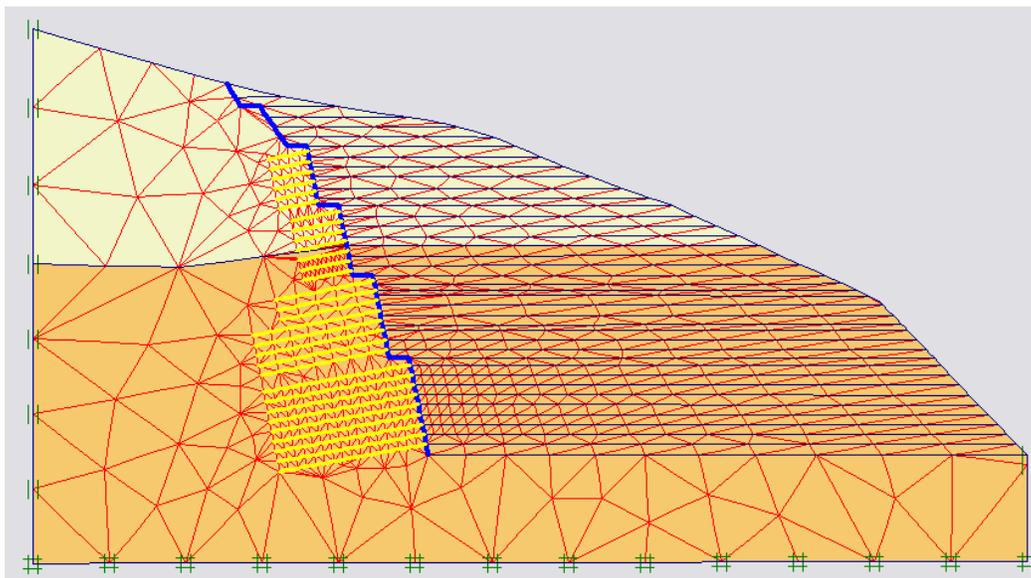


Figura 202 - Malha de Elementos Finitos utilizada para as simulações de escavação.

As condições iniciais de poropressão foram assumidas como desprezíveis uma vez que o nível d'água está localizado em cota inferior a cota final de escavação. Por outro lado, as condições iniciais de tensão foram consideradas de acordo com a Tabela 54. A Figura 203 mostra as tensões iniciais consideradas.

O processo construtivo foi simulado através de 69 etapas. O avanço dos serviços realizados foi representado no modelo da forma mais real possível. As etapas de escavação no campo variaram entre 0,5 e 2,0m.

As fases criadas para a simulação compreendem a escavação dos nichos, introdução dos grampos e execução da parede delgada de concreto projetado. As fases de introdução dos grampos e execução do concreto projetado são simultâneas.

Os grampos consistiram em barras de aço de 22mm de diâmetro comprimentos variando entre 4 e 15m (conforme projeto já apresentado anteriormente), introduzidos em pré-furos de 76mm de diâmetro.

O espaçamento entre os grampos foi de 1,0m na horizontal e 1,5m na vertical. Desse modo, a densidade de grampos foi superior a 6 grampos por m². Os grampos foram introduzidos com uma inclinação de 11° com a direção horizontal. Em cada etapa da escavação do talude, os grampos foram introduzidos simultaneamente com a consideração de uma parede de concreto projetado com espessura de 20mm.

Tabela 54 - Valores de K_0 utilizados para a definição das condições iniciais de tensão

Solo	Cota Inicial (m)	Cota Final (m)	ϕ'	$K_0 = (1 - \tan \phi')$
Solo Residual Maduro	54,0	32,0	23°	0,6
Solo Residual Jovem	32,0	10,8	30°	0,5

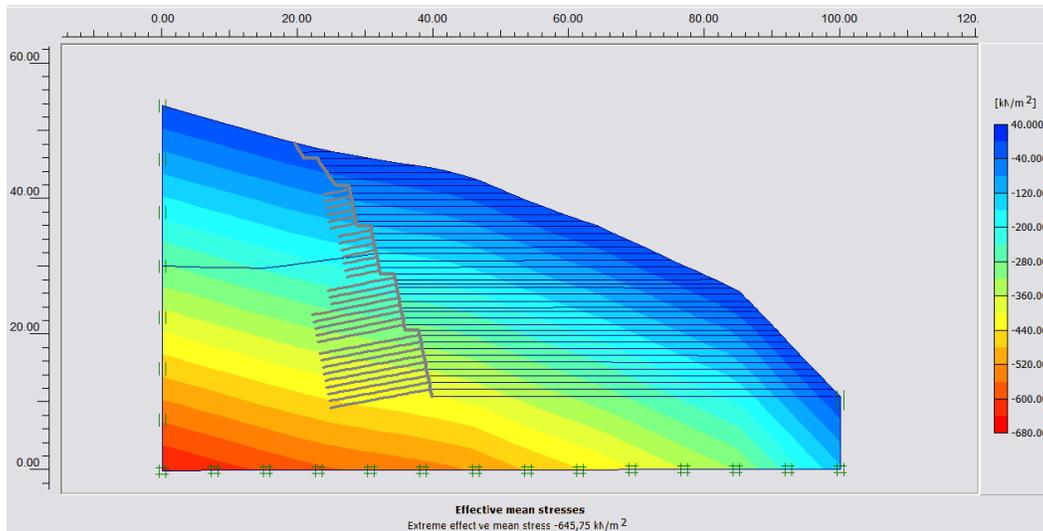


Figura 203 - Condição Inicial de Tensões para a Simulação de Escavação.

Os elementos de barra permitem a modelagem de estruturas esbeltas, que apresentam rigidez à flexão e axial, e são representados por 4 parâmetros: módulo de rigidez à flexão (EI), módulo de rigidez axial (EA), coeficiente de Poisson (ν) e o peso relativo (w).

No meio contínuo, o elemento de barra se superpõe ao solo; como consequência, o cálculo de w é feito através da equação:

$$w = (\gamma_c - \gamma_s) \times e \quad \text{Equação 17}$$

onde γ_c e γ_s são, respectivamente, o peso específico do concreto e do solo, e e é a espessura da barra.

Os geotêxteis são elementos esbeltos, que não apresentam rigidez à flexão. Estes elementos são capazes de suportar altos esforços de tração, mas não possuem resistência à compressão. No PLAXIS, os geotêxteis são representados apenas pela rigidez axial (EA).

No caso de interfaces solo-elemento, o programa disponibiliza um elemento específico (Elemento de Interface), regido pelo modelo elasto-plástico. Os níveis de tensão correspondentes aos comportamentos elástico e plástico

são definidos a partir do critério de resistência de Mohr-Coulomb. As propriedades dos elementos de interface são estimadas a partir dos parâmetros de resistência do solo (c_{solo} e ϕ_{solo}), com as equações:

$$c_{inter} = R \times C_{Solo} \quad \text{Equação 18}$$

e

$$tg\phi_{inter} = R \times tg\phi_{solo} \leq tg\phi_{solo} \quad \text{Equação 19}$$

onde R representa o fator de redução de resistência nas interfaces.

Waterman (2007) sugere valores de R entre 0,5 e 1,0, dependendo do tipo de solo e do tipo de material do elemento em contato. Para evitar descontinuidades na distribuição de tensões e deformações, o programa sugere a adoção de elementos de interface em regiões de mudança abrupta de condições de contorno.

Gerscovich et al. (2005) ressaltam que, para representar trechos ancorados de tirantes, o programa PLAXIS recomenda a utilização de elementos tipo geotêxtil, acrescidos de interface. Esta sugestão pode ser estendida aos grampos, face à semelhança entre o comportamento desses elementos.

7.4.2. Elementos Estruturais da Simulação

Os parâmetros utilizados na simulação numérica devem ser divididos em dois grupos: os elementos estruturais e os solos. Os elementos estruturais compreendem os grampos e a parede de concreto projetado.

O programa PLAXIS não dispõe de elemento estrutural específico para simulação do grampo. Para a simulação foi assumido que os grampos seriam modelados como geotêxtil e a face do concreto como elemento de barra.

As alternativas de uso do elemento de barra ou geotêxtil requerem a definição do módulo de elasticidade. Gerscovich et al. (2005) sugerem que o módulo de elasticidade seja calculado em função da média ponderada das áreas relativas ao aço e à injeção, conforme mostra a equação seguinte:

$$\bar{E} = \frac{(E_{injeção} \times A_{injeção}) + (E_{aço} \times A_{aço})}{A} \quad \text{Equação 20}$$

onde $E_{injeção}$ e $E_{aço}$ são, respectivamente, os módulos de elasticidade da injeção e do aço, $A_{injeção}$ corresponde à área da seção referente ao trecho injetado, $A_{aço}$ é a área da seção da barra de aço e A é a área total.

Com o objetivo de transformar a característica tridimensional dos parâmetros para o espaço bidimensional, alguns parâmetros (módulo de

elasticidade, carga de escoamento e rigidez no contato) foram divididos pelo espaçamento horizontal entre grampos. A Tabela 55 apresenta os parâmetros mecânicos considerados para os materiais estruturais. O grampo foi simulado utilizando-se o geotêxtil como elemento estrutural seguindo as recomendações de Ortigão (2007) e Waterman (2007).

Tabela 55 - Parâmetros utilizados para os elementos estruturais considerados

<i>Elemento</i>	<i>Material Estrutural</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Grampo	Geotêxtil	$\bar{E}A$	110MN/m
		$\bar{E}A$	$5 \times 10^7 \text{ kN/m}$
Concreto Projetado	Barra	$\bar{E}I$	$2 \times 10^5 \text{ KN.m}^2/\text{m}$
		w	0,46kN/m
		v	0,2

EA = módulo de rigidez axial, EI = módulo de rigidez à flexão, w = peso relativo, v = coeficiente de Poisson

De acordo com os ensaios de laboratório realizados foram considerados dois solos para a análise da encosta: solo residual maduro e solo residual jovem. O modelo geológico indicou a presença de um número maior de solos, no entanto, a variabilidade de comportamento dos mesmos é praticamente desprezível.

Deve ser ressaltada também a dificuldade em modelar geometrias com geologia muito variável. Entende-se que é preferível simular solos com um bom nível de conhecimento de seus parâmetros do que uma grande variabilidade de solos em uma mesma geometria onde os parâmetros são pouco conhecidos.

A campanha de investigação de laboratório realizada foi capaz de fornecer parâmetros satisfatórios para que as características de cada um dos solos envolvidos na análise fossem consideradas no modelo de comportamento proposto.

A utilização de um modelo constitutivo adequado traz grande contribuição para a correta previsão dos deslocamentos e deformações, aos quais a estrutura grampeada está submetida. Conseqüentemente, a escolha de um modelo adequado está diretamente ligada com uma boa simulação numérica.

7.4.3. Modelo Constitutivo de Endurecimento de Solo (Hardening Soil Model – HSM)

De acordo com Brinkgreve e Vermeer (1998), o modelo de Endurecimento tem sua superfície de plastificação não fixada ao espaço de tensões principais, mas pode expandir-se devido às deformações plásticas.

Devem ser feitas distinções entre os dois tipos de endurecimento: por cisalhamento e por compressão. O escoamento por cisalhamento é utilizado quando ocorrem deformações irreversíveis devido a uma carga desviadora. O endurecimento por compressão é utilizado para deformações plásticas irreversíveis devido à compressão no carregamento de consolidação e no carregamento isotrópico.

No caso especial do ensaio triaxial drenado, observou-se que a relação entre as tensões desviadoras e deformações axiais podem ser aproximadas por uma hipérbole. Esta relação foi formulada por Konder (1963) e mais tarde utilizada como o conhecido modelo hiperbólico de Duncan e Chang (1970).

Ibanez (2003) acrescenta que o modelo de endurecimento difere do modelo hiperbólico, por usar a teoria da plasticidade (ao invés da teoria da elasticidade) com parâmetros variáveis em diferentes intervalos de deformação, por incluir a dilatância do solo e por introduzir um limite na superfície de plastificação (Figura 204).

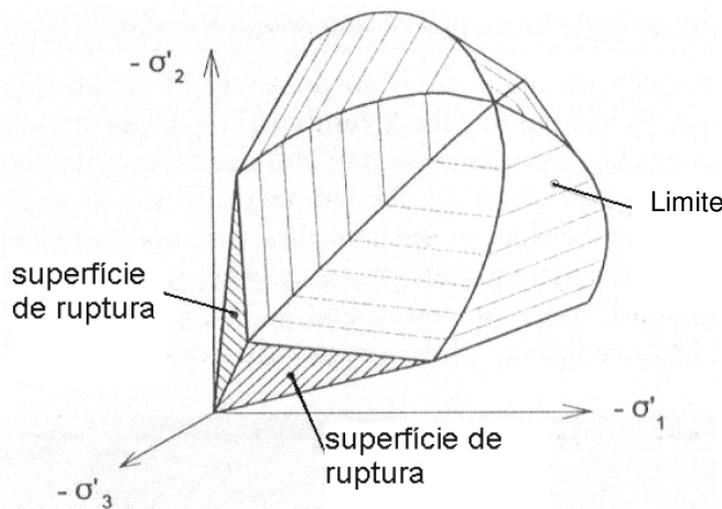


Figura 204 - Representação da superfície de plastificação do modelo de Endurecimento no espaço das tensões principais para um solo não coesivo (Frigerio, 1996).

Mais informações quanto à formulação do modelo HS podem ser encontradas em Ibanez (2003) e Waterman (2007). As características principais do modelo de endurecimento de solos são:

- A plastificação ocorre antes do critério de ruptura ser atingido;
- Tensões principais geram deformações plásticas volumétricas;
- Tensões desviadoras geram deformações plásticas cisalhantes e podem gerar também deformações plásticas volumétricas (dilatância);
- Rigidez referente a pequenos carregamento e descarregamento considerada na compressão e cisalhamento;
- Rigidez é função das tensões (não linear);
- Dilatância é mobilizada antes da ruptura.

É fundamental que os parâmetros fornecidos para o modelo estejam de acordo com as características do solo e as exigências do modelo. O modelo de endurecimento de solo utiliza parâmetros que devem ser obtidos com base nas investigações de laboratório e formulação própria do modelo.

As deformações cisalhantes plásticas são controladas pelo módulo secante a curva tensão deformação (E_{50} – módulo de Young). O módulo oedométrico (E_{oed}) é a relação referente às deformações plásticas volumétricas. As deformações elásticas, de acordo com a Lei de Hooke, são controladas pelo módulo referente às cargas de carregamento e descarregamento (E_{ur}). Como já foi dito anteriormente, os módulos são não lineares, portanto dependem do nível de tensão. A não linearidade dos módulos é determinada pelos parâmetros de resistência e do expoente m . A Tabela 56 reúne as equações que permitem a obtenção dos parâmetros para o modelo de endurecimento de solo.

Para argilas moles, é usualmente sugerido o valor de 1,0 para o expoente m . Lima (2007) apresenta algumas sugestões para o valor de m que variam entre 0,5 e 1,0. Waterman (2007) fornece valores para o expoente m em função do tipo de solo (Tabela 57).

O modelo de endurecimento ainda requer outros parâmetros para a realização de simulações numéricas. A Tabela 58 mostra estes parâmetros e o método de obtenção dos mesmos. Detalhes podem ser obtidos em Brinkgreve e Vermeer (1998).

Tabela 56 - Equações e módulos necessários para o modelo de endurecimento de solos

Parâmetro		Ensaio de Laboratório	Equação (Brinkgreve e Vermeer, 1998)
Modelo HS	Experimental		
E_{50}	E_{50}^{ref}	Triaxial Carregamento Axial ($p_{ref}=100\text{kPa}$)	$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \text{sen} \phi}{c \cos \phi + p_{ref} \text{sen} \phi} \right)^m$
E_{oed}	E_{oed}^{ref}	Adensamento ($p_{ref}=100\text{kPa}$)	$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_1 \text{sen} \phi}{c \cos \phi + p_{ref} \text{sen} \phi} \right)^m$
E_{ur}	E_{ur}^{ref}	Triaxial Descarregamento Lateral ($p_{ref}=100\text{kPa}$)	$E_{50} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \text{sen} \phi}{c \cos \phi + p_{ref} \text{sen} \phi} \right)^m$

Tabela 57 - Valores do expoente m em função do tipo de solo (Waterman, 2007)

Tipo de Solo	Valor de m
Areia	$m = 0,5$
Silte	$0,5 \leq m \leq 0,7$
Argila	$0,8 \leq m \leq 1,0$

Tabela 58 - Outros parâmetros necessários para o modelo de endurecimento de solos

Parâmetro	Descrição	Valor
ν_{ur}	Coefficiente de Poisson (trecho elástico)	$0,05 \leq \nu_{ur} \leq 0,2$
K_0^{nc}	Razão entre incrementos de tensão horizontal e vertical para início de carregamento	$1 - \text{sen} \phi$
R_f	Razão de ruptura (resistência verdadeira e a hiperbólica)	$R_f=0,9$
ψ	Ângulo de dilatância	$\psi=0^\circ$
R_{inter}	Parâmetro resistência de interface	Ensaio de interface

O modelo de endurecimento de solo utiliza os critérios de ruptura do modelo de Mohr-Coulomb. No entanto, permite uma melhor previsão de deslocamentos especialmente quando os esforços cisalhantes são dominantes e quando o comportamento ao descarregamento e recarregamento é importante. Waterman (2007) enfatiza que, para problemas relacionados com escavação, o modelo de endurecimento de solo é mais recomendado do que o modelo de Mohr-Coulomb. Dessa forma, foi utilizado o modelo de endurecimento para as simulações da escavação e estabilização da encosta na obra Museu II.

7.4.4. Obtenção de Parâmetros

A campanha de ensaios de laboratório revelou que existem dois tipos de solo na encosta: solo residual maduro e solo residual jovem. O resumo dos parâmetros é apresentado na Tabela 59.

De acordo com as considerações apresentadas, foram obtidos os parâmetros referentes ao modelo de endurecimento de solos. Deve ser destacado que na encosta existem outros materiais, tal como foi reportado por Gomes Silva (2006). No entanto, a campanha de laboratório identificou somente dois materiais dominantes. Os blocos que foram extraídos para a realização dos ensaios localizam-se na face do talude de escavação.

Uma das formas de obter parâmetros em regiões mais internas do talude seria a execução de investigações mais detalhadas, isto é, ensaios de campo. Apesar de estes ensaios fornecerem em geral correlações com parâmetros de interesse, a literatura tem mostrado que as informações estimadas com ensaios de campo podem ser usuais para a modelagem numérica (Ortigão, 2007).

Tabela 59 - Resumo dos parâmetros obtidos por meio de ensaios de laboratório

Descrição	<i>Solo Residual Maduro</i>	<i>Solo Residual Jovem</i>
	Argila Arenosa	Areia Argilosa
γ_{nat}	17,6 kN/m ³	18,2 kN/m ³
γ_{sat}	17,6 kN/m ³	18,2 kN/m ³
c	28 kPa	59 kPa
ϕ	23°	30°
E ₅₀	6 MPa	21 MPa
E _{oed}	6 MPa	21 MPa
E _{ur}	8 MPa	33 MPa
ν_{ur}	0,25	0,28
ψ	0°	0°
R _{inter}	0,7(*)	0,8(*)

(*) Parâmetro obtido em de ensaios de interface (Proto Silva 2005)

A Tabela 60 mostra os parâmetros obtidos com a formulação apresentada. Estes valores foram utilizados para o início das simulações. Os valores apresentados foram modificados, dentro dos limites de comportamento do

material, de modo ao modelo computacional reproduzir de maneira mais fiel as observações verificadas em campo.

Tabela 60 - Parâmetros de referência obtidos para o modelo de endurecimento de solos

Descrição	<i>Solo Residual Maduro</i>	<i>Solo Residual Jovem</i>
	Argila Arenosa	Areia Argilosa
γ_{nat}	17 kN/m ³	18 kN/m ³
γ_{sat}	17 kN/m ³	18 kN/m ³
c	28 kPa	59 kPa
ϕ	23°	30°
E ₅₀	1,2 MPa	4,2 MPa
E _{oed}	1,2 MPa	4,2 MPa
E _{ur}	2,4 MPa (**)	8,4 MPa
ν_{ur}	0,2	0,2
m	0,8	0,8(*)
K ₀ ^{nc}	0,6	0,5
R _f	0,9	0,9
ψ	0°	0°
R _{inter}	0,7	0,8

(*) apesar de o material ter predomínio de areia, o teor de argila confere um comportamento plástico para o material; (**) o valor para E_{ur} corresponde a 2E₅₀.

7.4.5. Resultados Obtidos

Uma vez definidos os parâmetros para os elementos estruturais e os solos, procurou-se estudar de forma paramétrica a variabilidade destes parâmetros, em função dos dados de instrumentação disponíveis e apresentados no capítulo 06. Os resultados computacionais obtidos foram comparados com os dados de instrumentação.

As simulações consideraram a escavação da encosta em etapas, tal como foi observado em campo. O programa PLAXIS permite que sejam simulados os serviços de escavação de forma bastante parecida ao que acontece no campo. Cada uma das etapas de escavação é simulada em três fases distintas:

- I. Remoção da massa de solo até a cota final de escavação;
- II. Introdução do grampo na encosta;
- III. Construção da parede de concreto projetado.

Cada uma dessas fases é repetida em casa avanço de escavação. Portanto, é possível simular os trabalhos de campo. No entanto, cabe destacar que a escavação em nichos, que foi realizada na encosta, não pode ser simulada neste modelo computacional com análise considerando deformações planas. A Figura 205 mostra uma das etapas de escavação simuladas no programa PLAXIS para a obra Museu II.

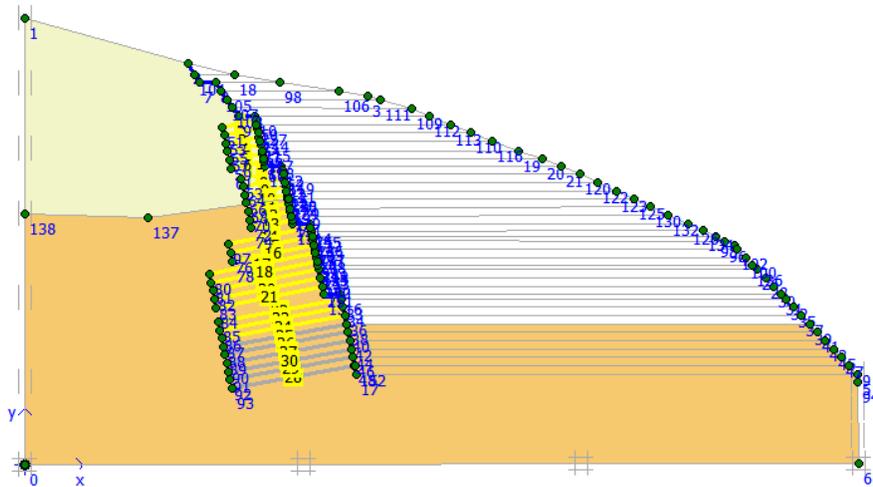


Figura 205 - Simulação das etapas de escavação e aplicação de grampos no programa PLAXIS.

A análise paramétrica foi realizada variando-se o módulo de alguns parâmetros do solo, dos grampos e da parede de concreto projetado até que os dados computacionais estivessem similares às leituras instrumentação.

Realizar estudos paramétricos com um grande número de variáveis é tarefa bastante complexa. Alguns dos aspectos que confirmam essa afirmação estão listados a seguir:

- A diversidade geológica da encosta;
- Existência de feições geológicas não identificadas no talude;
- As imperfeições topográficas da escavação consideradas no modelo computacional;
- A geometria tridimensional da escavação;
- A dificuldade para obter parâmetros representativos de solo em função do tipo de ensaio e da trajetória de tensões;
- Possíveis comportamentos anômalos registrados pelos instrumentos;
- Limitações do modelo computacional quanto ao comportamento de solos e de elementos estruturais.

A Tabela 61 e a Tabela 62 trazem os parâmetros geomecânicos (solos e elementos estruturais) que forneceram a melhor aproximação entre as observações de campo e os resultados do programa PLAXIS.

Tabela 61 - Parâmetros obtidos para os elementos estruturais com base no estudo paramétrico.

<i>Elemento</i>	<i>Material</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
	<i>Estrutural</i>		
Grampo	Geotêxtil	$\bar{E}A$	140MN/m
		$\bar{E}A$	4×10^6 kN/m
Concreto Projetado	Barra	$\bar{E}I$	10^4 KN.m ² /m
		w	0,46kN/m
		v	0,2

EA = módulo de rigidez axial, EI = módulo de rigidez a flexão, w = peso relativo e v = coeficiente de Poisson

Os itens a seguir trazem os resultados obtidos pela simulação numérica comparados com os dados de leituras de inclinômetros, *tell-tales* e grampos instrumentados.

Tabela 62 - Parâmetros de referência obtidos para o modelo de endurecimento de solos

Descrição	<i>Solo Residual Maduro</i>	<i>Solo Residual Jovem</i>
	Argila Arenosa	Areia Argilosa
γ_{nat}	17 kN/m ³	18 kN/m ³
γ_{sat}	17 kN/m ³	18 kN/m ³
c	28 kPa	59 kPa
ϕ	23°	30°
E_{50}	2,0 MPa	5,0 MPa
E_{oed}	2,0 MPa	5,0 MPa
E_{ur}	4,8 MPa (*)	11,0 MPa
ν_{ur}	0,2	0,2
m	0,5	0,5
K_0^{nc}	0,7	0,7
R_f	0,9	0,9
ψ	0°	0°
R_{inter}	0,8	0,8

(*) o valor para E_{ur} corresponde a $2E_{50}$.

7.4.6. Previsão de Deslocamentos

Por desconsiderar as deformações no interior da massa reforçada, análises por equilíbrio limite não incorporam a redistribuição de esforços nos grampos ao longo das etapas de construção. Portanto, fornecem um fator de segurança global que não reproduz corretamente o comportamento do maciço. Resultados experimentais e programas de instrumentação ajudaram a definir da magnitude das deformações em estruturas de solo grampeado (Clouterre, 1991).

Segundo observações de campo, no estágio final de construção, os deslocamentos horizontais no topo da escavação variam entre 0,10%H e 0,30%H, sendo reduzidos à medida que se distanciam da face. Variações de 0,07%H a 3,0%H foram observadas em obras nos Estados Unidos e entre 0,25%H a 0,30%H na Alemanha (Schlosser et al., 1992).

As simulações computacionais permitiram a comparação entre os deslocamentos de campo e os dados obtidos pelo programa PLAXIS. Na malha de elementos finitos foram selecionados pontos que correspondiam aos pontos onde estavam instalados os instrumentos na encosta. As fases de escavação foram correlacionadas com as datas registradas em campo. Desse modo, os dados numéricos referentes à cota de escavação foram associados à mesma data na qual aquela cota de escavação fora atingida. Logo, foi possível fazer a comparação entre os dados numéricos e de campo. Os itens seguintes apresentam as comparações para cada um dos instrumentos.

7.4.7. Inclinômetros

A localização e as cotas do Inclinômetro 01 foram apresentadas no Capítulo 06, que trata dos dados de monitoramento.

Na Figura 206 são comparados os deslocamentos horizontais medidos no inclinômetro 01 com os obtidos na simulação numérica. Observa-se que os deslocamentos numéricos foram na maioria das vezes inferiores aos medidos com os inclinômetros, com exceção das leituras fornecidas para a cota 40m.

As trajetórias de deslocamentos são praticamente equivalentes com exceção dos dados da cota 40m. Os resultados numéricos possuem tendência de estabilização após o término das escavações. Por outro lado, os dados inclinométricos não sugerem o mesmo comportamento. O modelo constitutivo utilizado não incorpora movimentações adjacentes a obra. Este fato pode explicar que a tendência de estabilização dos dados numéricos não acompanhe

a trajetória obtida para o inclinômetro 01. As diferenças entre as leituras numéricas e de campo ficaram em torno de 20%.

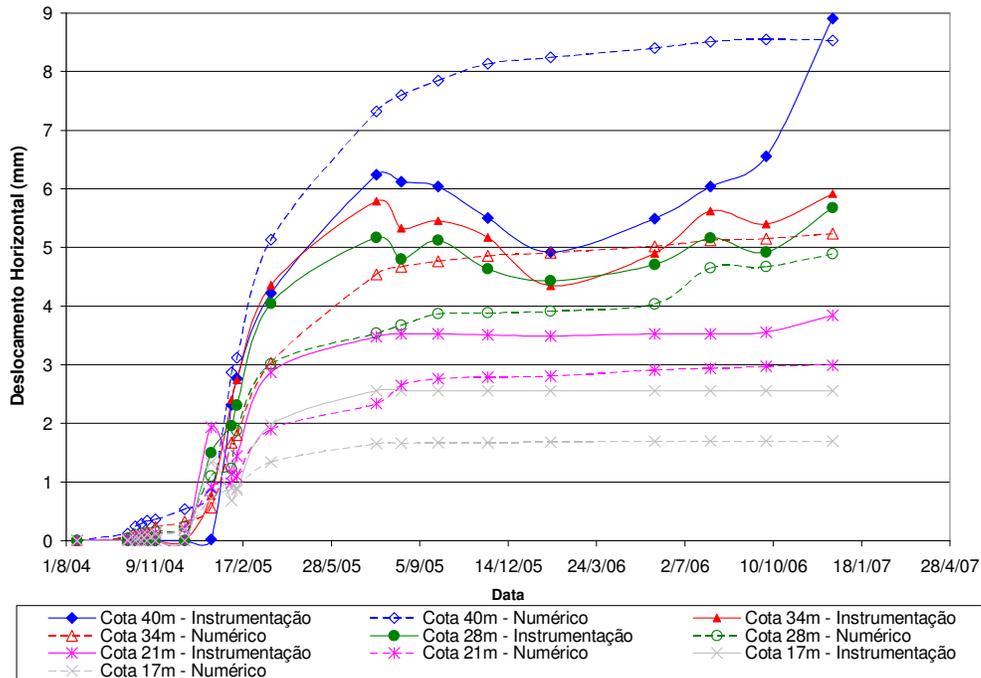


Figura 206 - Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras do inclinômetro 01.

Para o inclinômetro 03 verificou-se uma tendência de aceleração de deslocamentos, mesmo após o término das escavações. Este comportamento inesperado pode ser atribuído à limitação do modelo constitutivo ou pela modelagem imprecisa de alguma feição geológica na região. De um modo geral é difícil modelar juntas ou planos de falhas em virtude da dificuldade na obtenção de parâmetros geométricos ou geomecânicos.

Inversamente ao que foi observado para o inclinômetro 01, as leituras numéricas para o inclinômetro 03 foram inferiores às leituras de campo. Esta diferença pode ser atribuída ao efeito tridimensional e à dificuldade e, provável, imperfeição na modelagem da região onde está inserido o inclinômetro 01. As diferenças entre as leituras previstas e medidas foram inferiores a 20% até o dia 28/05/05. Após esta data, é possível notar uma tendência de aceleração de deslocamentos para os dados de campo e de estabilização para os dados numéricos.

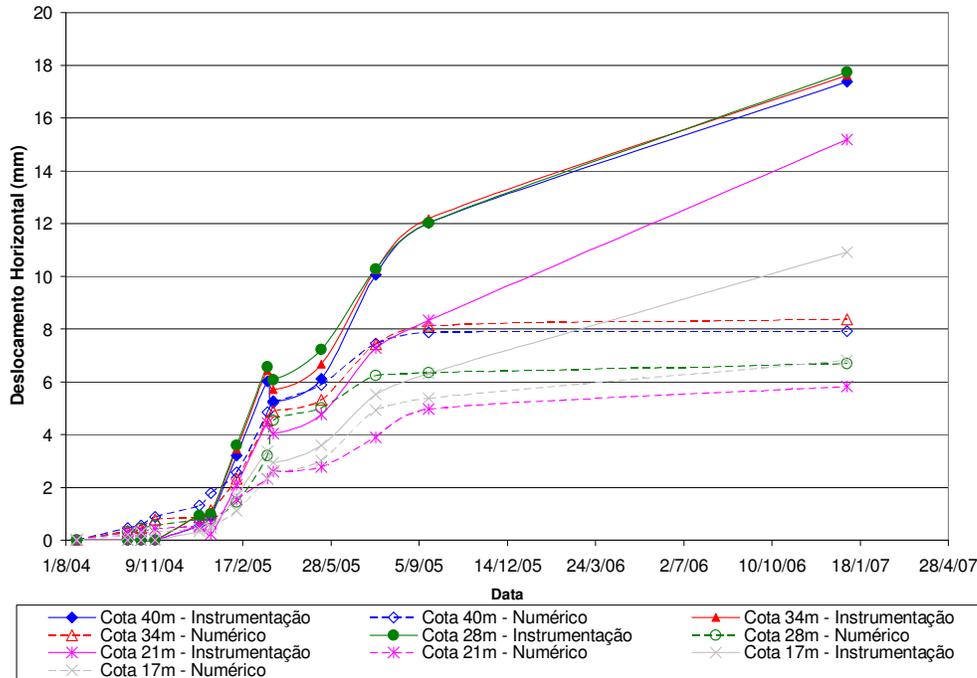


Figura 207 - Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras do inclinômetro 03.

7.4.8. Tell-tales

A localização dos *tell-tales*, bem como as cotas que foram consideradas em sua análise, foi apresentada no capítulo 06, que trata dos dados de monitoramento.

Na seqüência da Figura 208 até a Figura 212 são comparadas os deslocamentos horizontais obtidos com os *tell tales* com os dados da modelagem numérica.

De um modo geral, afirma-se que a simulação representou de forma satisfatória os dados de campo até o dia 14/12/05. No período entre o início das leituras e o dia 14/12/05, a diferença entre as leituras previstas e medidas não foi superior a 25%.

As trajetórias de deslocamentos horizontais para os casos numérico e de campo são também equivalentes, o que demonstra que as fases de escavação e o modelo de comportamento da encosta estavam adequados com as condições de campo.

No entanto, para a leitura realizada após 14/12/05, a diferença entre o campo e o modelo computacional foi superior a 50%. Os *tell tales* após esta data registraram leituras bastante superiores às últimas leituras. Este fato pode ser

atribuído a uma relaxação do sistema de instrumentação, o qual já foi reportada no capítulo 06. O modelo constitutivo não simula estes comportamentos que não retratam o real comportamento da escavação.

O mesmo padrão de comportamento pode ser observado para todas as cinco caixas de *tell tales* monitoradas.

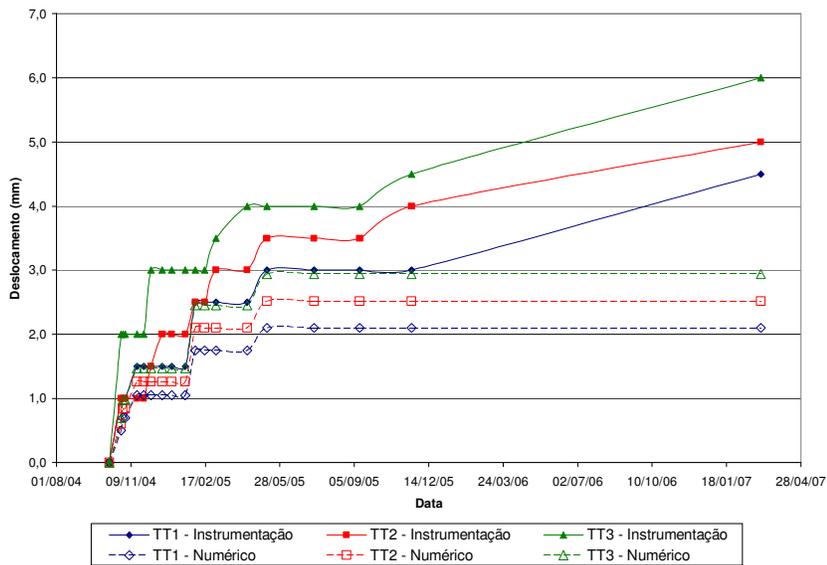


Figura 208 - Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras dos *tell-tales* da caixa 01.

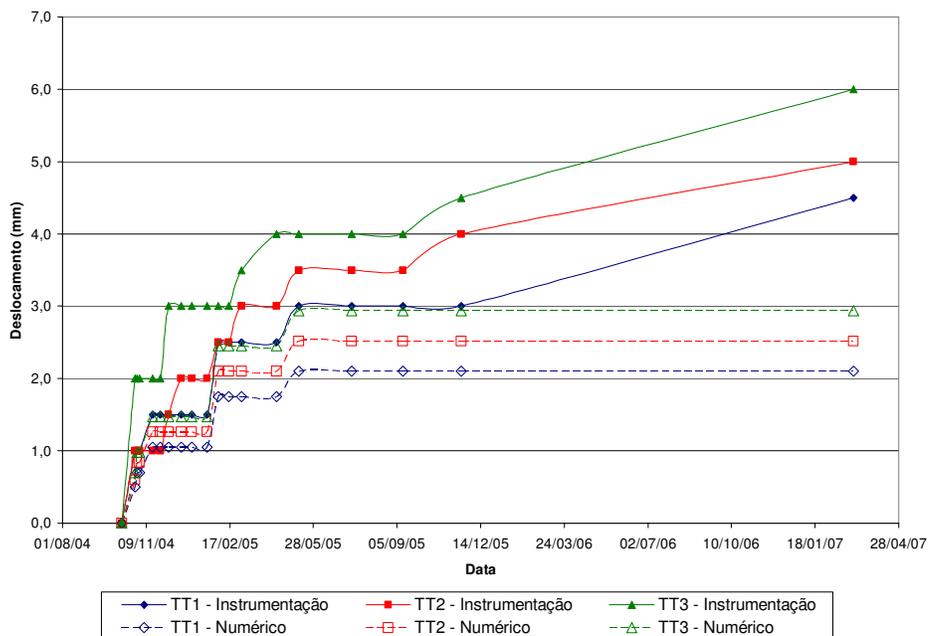


Figura 209 - Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras dos *tell-tales* da caixa 02.

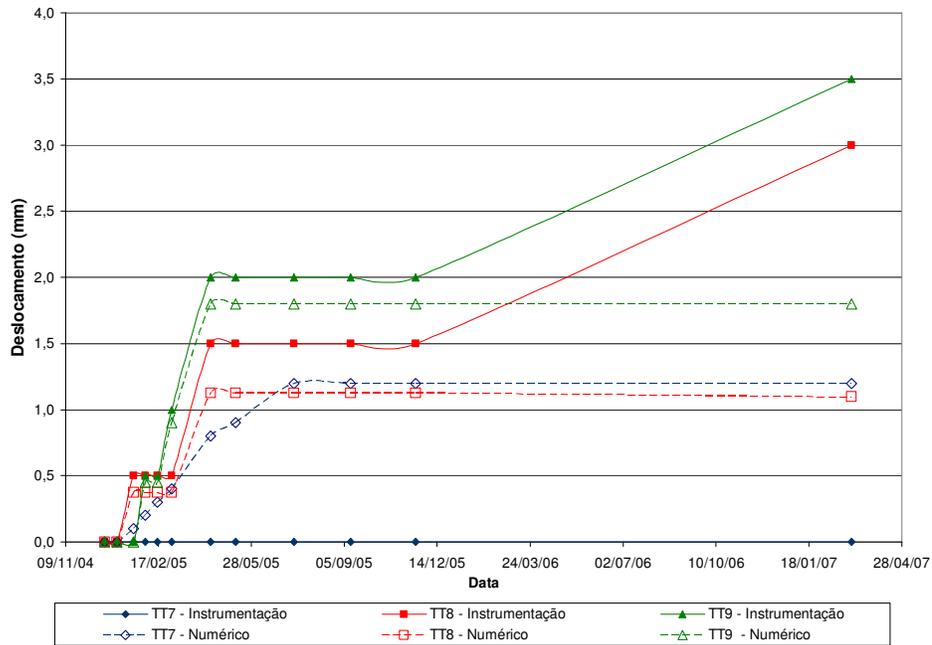


Figura 210 - Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras dos tell-tales da caixa 03.

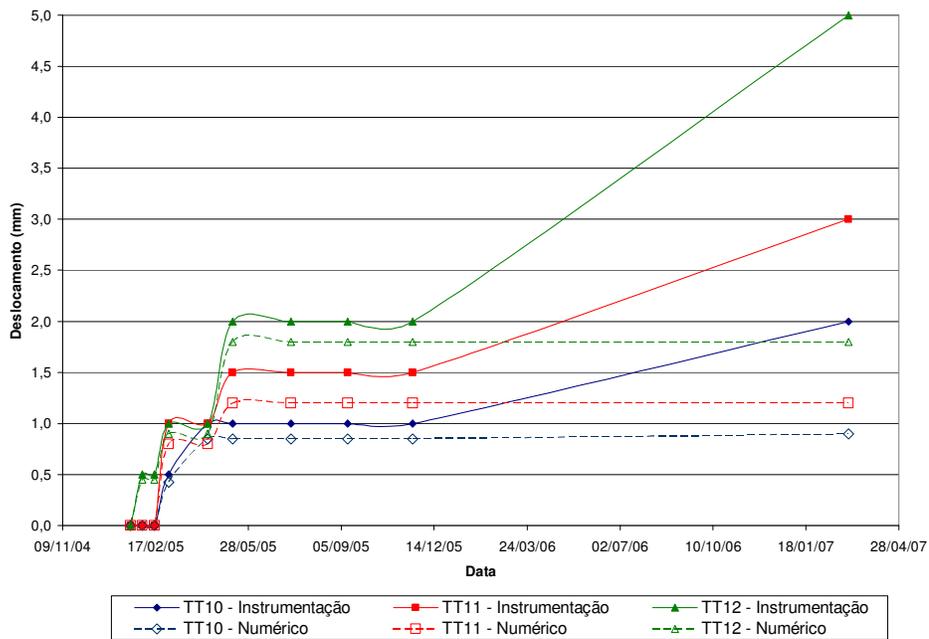


Figura 211 - Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras dos tell-tales da caixa 04.

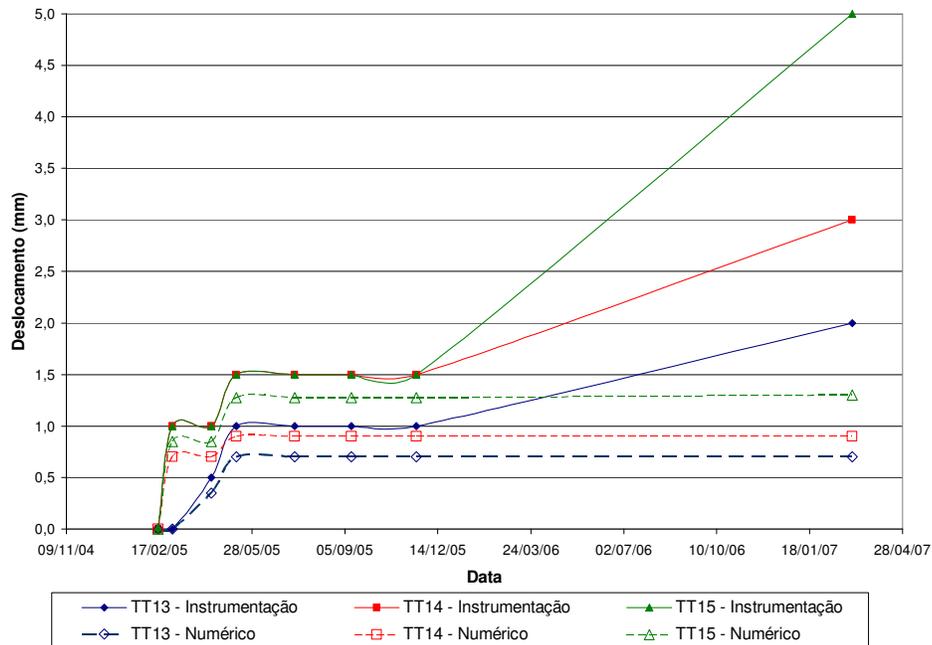


Figura 212 – Comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos por meio de simulação numérica e leituras dos tell-tales da caixa 05.

7.4.9. Comparação das Cargas nos Grampos

A simulação numérica também permitiu que fossem comparadas as cargas verificadas nas diversas fases de escavação com as cargas obtidas por meio de simulação numérica. No grampo simulado numericamente foi identificado o ponto que correspondia à localização do *strain gage* na barra, o que permitiu que as cargas dos *strain gages* fossem comparadas com os dados numéricos.

Deve ser destacado que o elemento estrutural utilizado para representar os grampos foi a geogrelha, que possui continuidade lateral. Os parâmetros do grampo foram minorados de acordo com o procedimento sugerido por Gerscovich et al. (2005). Durante o processo de simulação numérica, também não foi considerada a fase de escavação do furo onde foi aplicado o grampo. Waterman (2007) e Ortigão (2007) afirmam que a não simulação da fase de escavação tem influência desprezível no desenvolvimento de tensões em função da pequena dimensão da intervenção.

Os resultados para o grampo de 4m de comprimento sugerem que a modelagem numérica funcionou de forma satisfatória para este caso (Figura 213). A comparação entre os três *strain gages* e os pontos equivalentes da

malha demonstra que existe similaridade de comportamento especialmente para o *strain gage* 02.

Este ponto localiza-se na região mais próxima à face do talude. Os ensaios foram realizados com material próximo à face. Portanto, pode-se afirmar que o modelo funcionou de forma adequada especialmente para este região. Por outro lado, o *strain gage* 0 apresentou cargas sensivelmente maiores no início da fase de escavação, quando comparadas com os dados análogos numéricos. Este fato pode ser atribuído a uma região de maior rigidez no interior da massa, que não foi contemplada pelo modelo computacional.

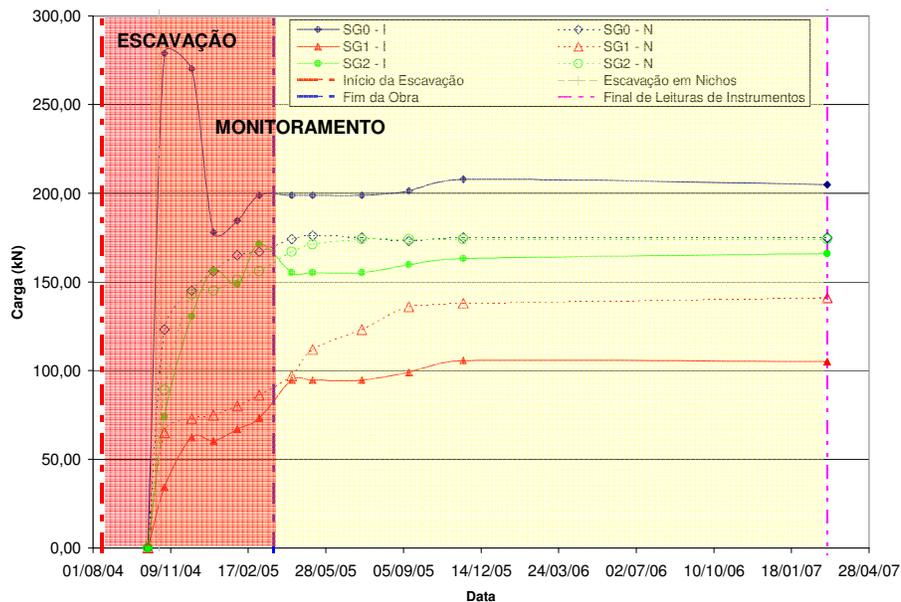


Figura 213 - Comparação entre as cargas obtidas por meio de simulação numérica e leituras dos grupos de 4m instrumentados.

A Figura 214 mostra a comparação da distribuição de cargas ao longo do grampo para dois momentos distintos da escavação. Nota-se que a tendência oferecida pela simulação numérica é inversa ao comportamento medido no campo para o período. É possível intuir que as regiões mais internas do talude oferecem maior rigidez. Esta observação é válida uma vez que a encosta apresenta um perfil de intemperismo bem desenvolvido, com materiais menos intemperizados, e por conseqüência, mais rígidos nas porções menos expostas do talude.

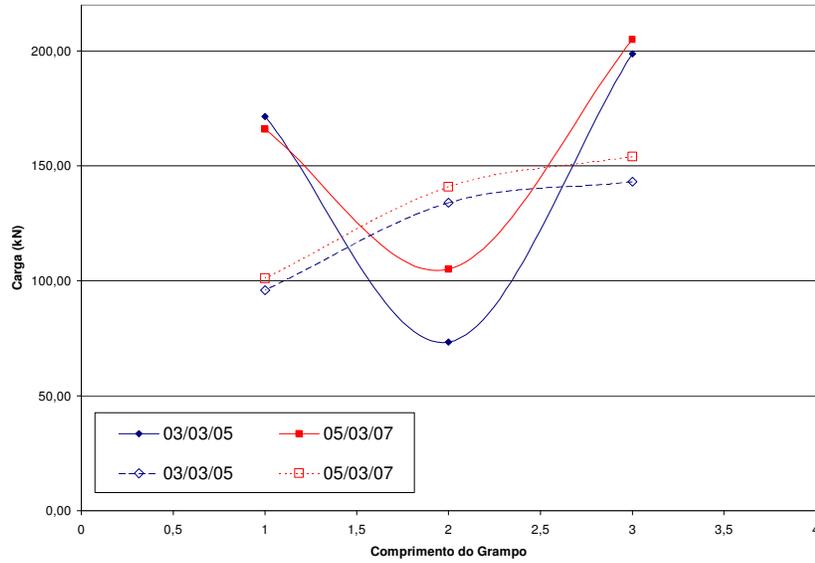


Figura 214 - Comparação entre distribuição de carregamentos ao longo do grampo obtida por meio de simulação numérica e leituras dos grampões de 4m instrumentados.

Para o grampo de 5m (Figura 215), a comparação entre as cargas nos *strain gages* com os dados numéricos sugere que a simulação apresentou cargas maiores daquelas registradas em campo. Os valores numéricos são em torno de 25% maiores do que as leituras de campo. Tal como foi observado para o grampo de 4m, a trajetória de cargas para as duas leituras possui padrão equivalente, o que qualifica a simulação de escavação como adequada. As diferenças de carga registradas ficaram em torno de 30% e são devidas à diferença de rigidez entre o material de campo e do modelo numérico.

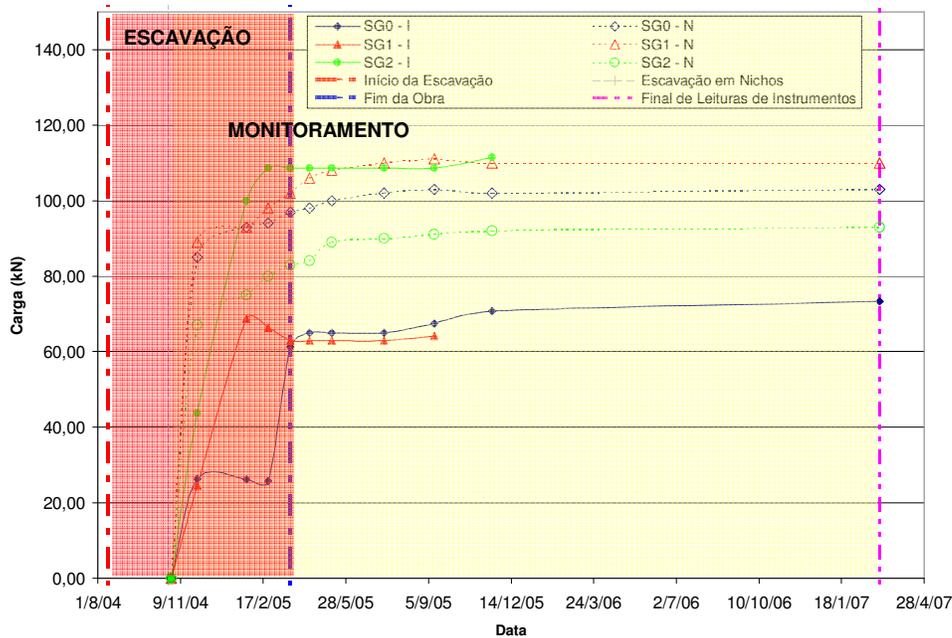


Figura 215 - Comparação entre as cargas obtidas por meio de simulação numérica e leituras dos grampos de 5m instrumentados.

As diferenças de valores de rigidez são evidentes quando a Figura 216 é avaliada. As cargas obtidas nas leituras de campo são maiores no trecho inicial da barra. Este comportamento pode ser explicado pela ocorrência de uma zona de maior rigidez nas proximidades do talude, ou por algum plano de menor resistência na porção mais interna. Os resultados numéricos devem ser encarados como uma ordem de grandeza dos esforços desenvolvidos.

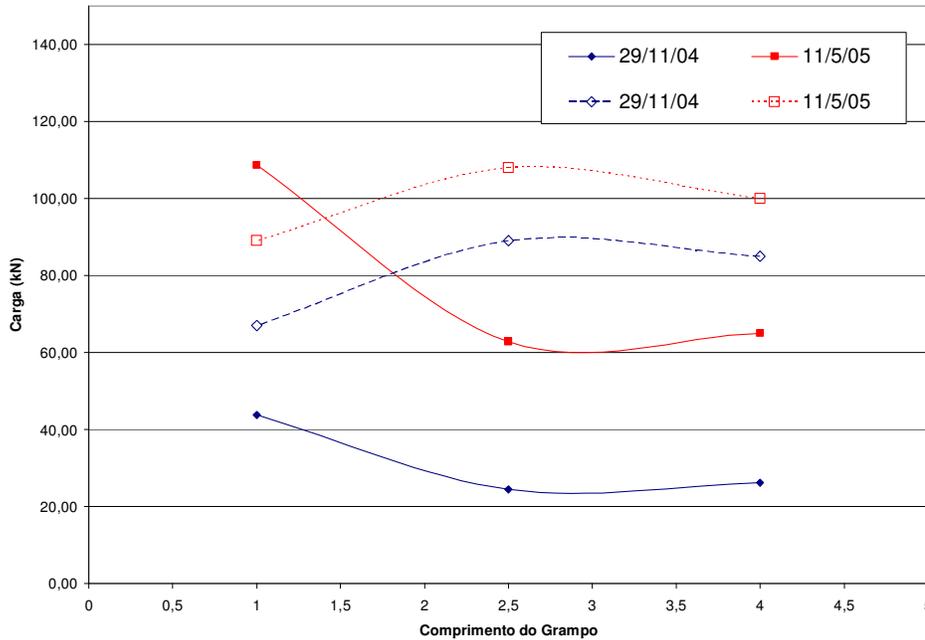


Figura 216 - Comparação entre distribuição de carregamentos ao longo do grampo obtida por meio de simulação numérica e leituras dos grampos de 5m instrumentados.

Os grampos de 10m de comprimento mostraram alguns *strain gages* com cargas reduzidas durante o processo de escavação (Figura 217). A modelagem numérica indicou valores de cargas sensivelmente maiores. Possivelmente os *strain gages* com menores carregamentos estavam em região de material com menor rigidez ou então não funcionaram de modo adequado. Excluindo a comparação com os *strain gages* que apresentaram pequenas cargas, as diferenças entre as leituras de campo e numéricas não foram superiores a 30%.

A Figura 218 sugere que deve ter ocorrido uma redistribuição dos esforços no grampo em função de regiões de menor rigidez ao longo do comprimento. A distribuição de esforços obtidas por meio de simulação é bastante similar ao padrão previsto por Clouterre (1991). Não foi possível notar grande diferença entre os valores de cargas para os dois momentos apresentados na Figura 218. Como foi dito anteriormente, o modelo de endurecimento de solos não é aplicado para casos de fluência, por exemplo.

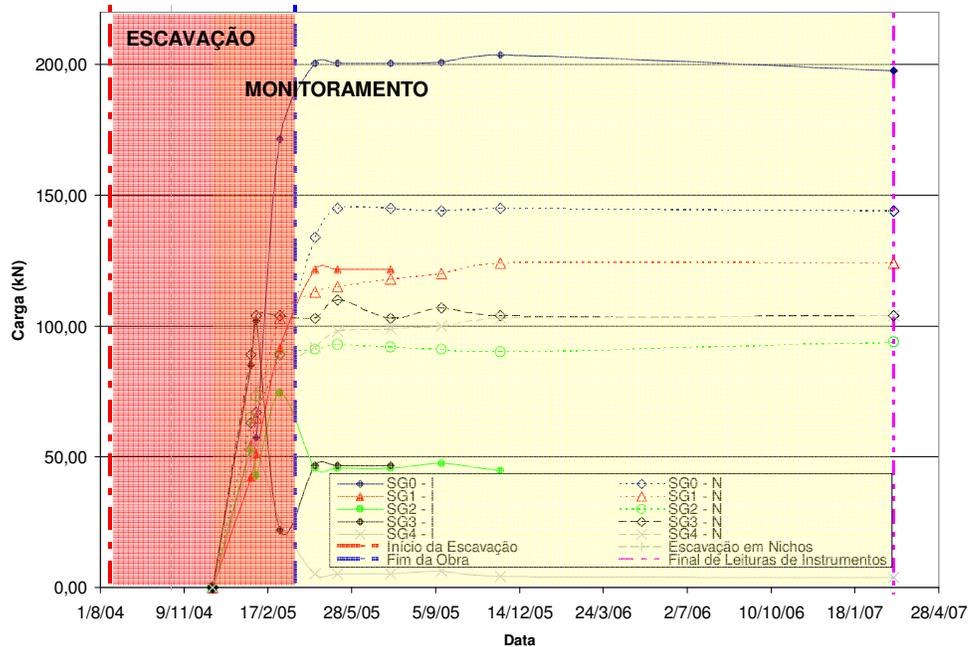


Figura 217 - Comparação entre as cargas obtidas por meio de simulação numérica e leituras dos grupos de 10m instrumentados.

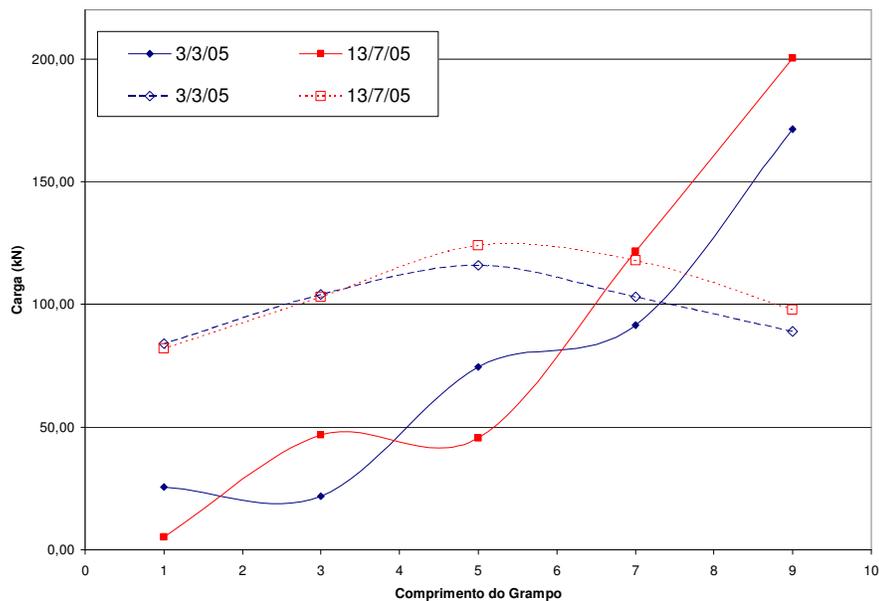


Figura 218 - Comparação entre distribuição de carregamentos ao longo do grampo obtida por meio de simulação numérica e leituras dos grupos de 10m instrumentados.

Os picos de carregamento registrados para alguns instrumentos instalados na barra de 13m não foram reproduzidos na simulação numérica por limitações do modelo computacional (Figura 219). Após a ocorrência destes picos na fase

de escavação, os carregamentos para os dois casos (campo e numérico) seguiram o mesmo padrão. As diferenças entre as leituras de instrumentação e as obtidas na modelagem foram inferiores a 25% para a carga final nos grampos.

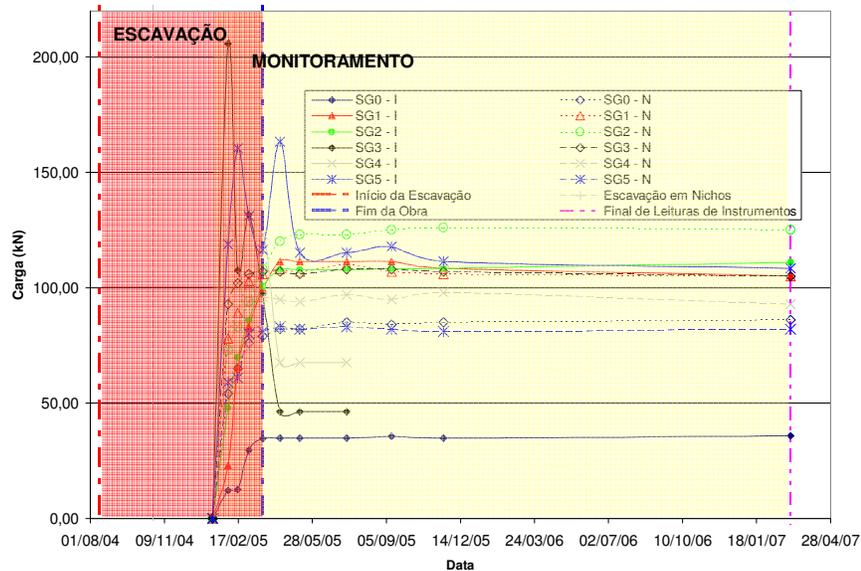


Figura 219 - Comparação entre as cargas obtidas por meio de simulação numérica e leituras dos grampos de 13m instrumentados.

A distribuição de cargas na simulação numérica é uniforme e compatível com a previsão de Clouterre (1991). A previsão de Clouterre (1991) foi realizada para solos homogêneos com grampos de 10m inseridos, em um único tipo de solo. Por outro lado, a modelagem geológica mostrou que existem veios de material menos resistente na encosta que podem estar atravessando os elementos instrumentados. A Figura 220 compara os resultados entre o modelo numérico e as leituras de campo para o grampo de 13m.

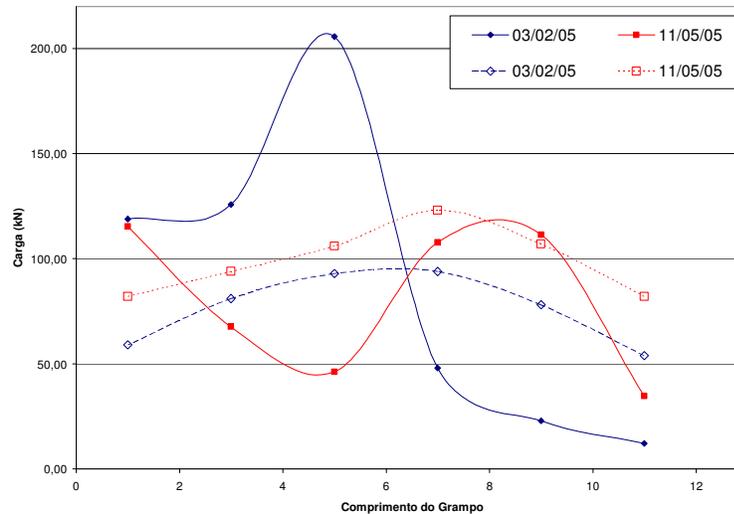


Figura 220 - Comparação entre distribuição de carregamentos ao longo do grampo obtida por meio de simulação numérica e leituras dos grampos de 13m instrumentados.

Os grampos instrumentados de 15m de comprimento estão inseridos na base da escavação e inseridos em uma região de grande diversidade geológica com a ocorrência de veios em solo residual com reduzido estado de alteração. O modelo computacional possui apenas dois tipos de solos. Logo, ocasiona como grande limitação a dificuldade em se modelar muitos materiais na encosta. Por este motivo, as previsões de comportamento para as regiões de menor cota não fornecem resultados muito acurados (Figura 221).

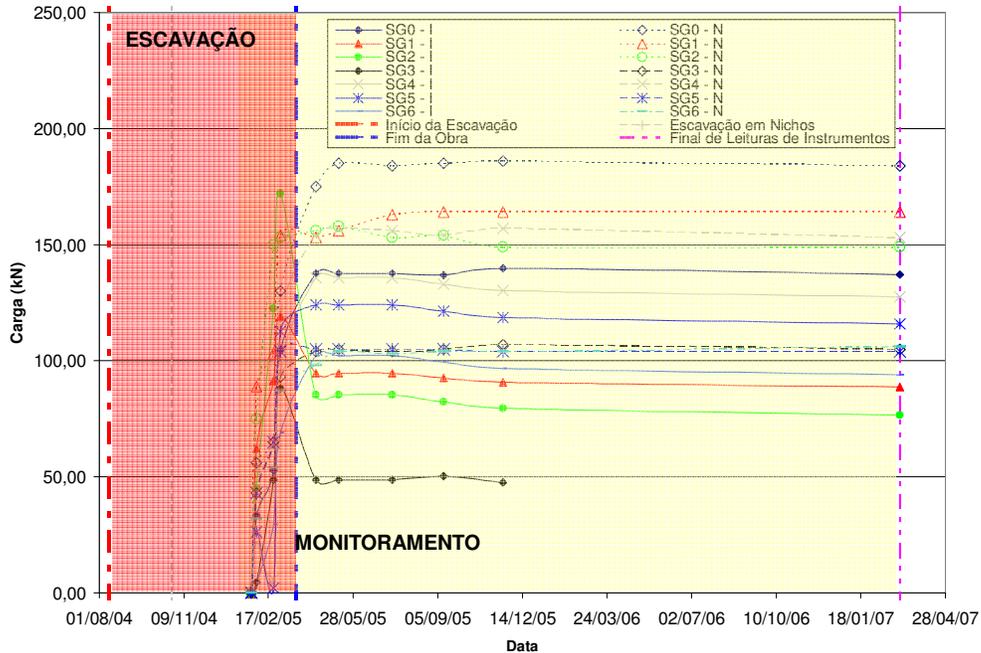


Figura 221 - Comparação entre as cargas obtidas por meio de simulação numérica e leituras dos grampes de 15m instrumentados.

A mesma consequência pode ser observada na comparação de distribuição de cargas ao longo do grampo para a simulação numérica e os dados de instrumentação. A distribuição numérica é bastante uniforme e tem padrão similar ao previsto por Clutterre (1991). Enquanto que para o caso da instrumentação de campo a distribuição de cargas é errática deve refletir a diversidades de materiais da região.

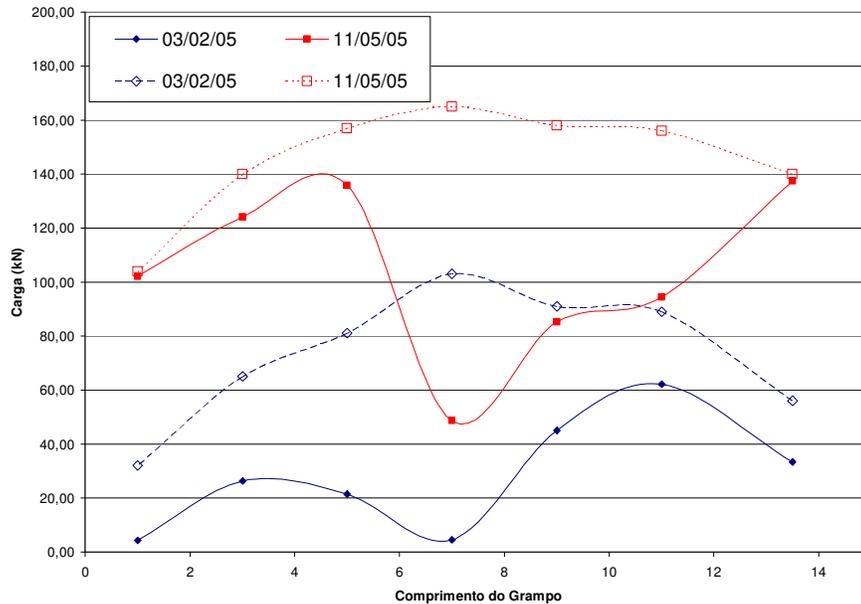


Figura 222 - Comparação entre distribuição de carregamentos ao longo do grampo obtida por meio de simulação numérica e leituras dos grampos de 15m instrumentados.

7.5. Resumo das Simulações Numéricas

A utilização das ferramentas numéricas GEOSLOPE e PLAXIS mostrou-se adequada ao estudo de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss. A comparação entre os comportamentos registrados no campo e os previstos numericamente permite que sejam supostas tendências de comportamento para a escavação.

O programa Geoslope foi utilizado para análises de equilíbrio limite. Foram simuladas as diversas etapas de escavação da encosta com a inclusão dos grampos na medida em que os patamares de escavação eram atingidos.

A análise da evolução do fator de segurança permitiu que fossem identificadas, durante o processo de escavação, as fases críticas de projeto. A principal conclusão obtida foi que esta escavação grampeada funciona como um grande muro de peso colocado na base do talude. A distribuição de projeto, com grampos menores na parte superior e maiores na parte inferior, torna a estrutura equivalente a uma estrutura de solo reforçado. Esta concepção é diferente do grampeamento aplicado na obra adjacente, reportado por Lima (2007).

Os menores fatores de segurança referem-se a pontos de estabilidade localizada na face do talude da escavação. A estabilidade global também foi investigada por meio de superfícies potenciais de ruptura inferidas por meio dos

dados de instrumentação: inclinômetros, *tell-tales* e grampos instrumentados. Os resultados sugerem ou confirmam que as superfícies críticas se referem à estabilidade local e não global.

O programa PLAXIS utiliza o método dos elementos finitos para avaliar o comportamento tensão deformação de uma obra geotécnica. O programa tem sido bastante utilizado para a simulação de escavações grampeadas (Gerscovich et al., 2005; Waterman, 2007 e Ortigão, 2007).

Foram simuladas as diversas fases de escavação dos patamares, inclusão dos grampos e aplicação da parede de concreto projetado. Os parâmetros utilizados para cada um desses parâmetros devem seguir um modelo constitutivo de comportamento. Para a escavação do Museu II, o modelo de endurecimento foi escolhido para os solos. A escolha do modelo é decisiva nos resultados de um estudo numérico. O modelo de endurecimento possui como vantagens a possibilidade de realizar análises com módulos de elasticidade não lineares e a consideração do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Uma vez definidos os parâmetros de referência para cada um dos materiais, foi desenvolvido um estudo paramétrico com o objetivo de ajustar os resultados previstos aos resultados medidos no campo.

A comparação entre os resultados de campo e numéricos foi adequada tanto para os deslocamentos como para as cargas nos grampos. Na maioria dos casos, as diferenças estiveram entre 15 e 30%. Imprecisões da modelagem ocorreram e foram significativas e podem ser atribuídas fundamentalmente à não representatividade de parâmetros, limitações do modelo e modelagem diferindo das reais características de campo.