

## 6

### Estudo do comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss

O estudo do comportamento da escavação descrita no capítulo 04, juntamente à discussão dos resultados do programa de instrumentação geotécnica, encontram-se neste capítulo.

#### 6.1.

##### Análises adicionais em Equilíbrio Limite

Novas análises de estabilidade foram realizadas com o objetivo de se avaliar a condição de segurança do talude após a conclusão da obra. Utilizou-se a Teoria de Equilíbrio Limite para a determinação do fator de segurança global (FS) com o auxílio do programa “STABL for Windows” (Purdue University, 2000).

Para estas análises adicionais foram adotados os parâmetros representativos das camadas de solos residuais determinados nos ensaios de laboratório (capítulo 5) e nos ensaios de arrancamento no campo (Springer, 2006). Também foram consideradas as modificações da geometria e densidade dos grampos, registradas no acompanhamento da escavação. Os valores de FS foram comparados com aqueles fornecidos na fase de projeto, permitindo verificar a validade das hipóteses de cálculo utilizadas na concepção da obra.

- **Avaliação do FS em função das mudanças no projeto:**

Um novo estudo da estabilidade global do maciço foi realizado, tendo em vista às modificações implementadas na seção-tipo inicial (Figura 86), tais como: nova densidade de grampos, modificações das condições da geologia local, parâmetros de resistência ao cisalhamento e valores de  $q_s$  do solo. A partir das condições iniciais de projeto, executou-se uma análise paramétrica para avaliar a influência destas modificações na condição de segurança do talude. O cálculo do fator de segurança global foi realizado pelo método de Bishop Simplificado (superfícies de ruptura circulares).

A Tabela 59 fornece um resumo com os novos parâmetros geomecânicos adotados nas análises e a Figura 148 apresenta a seção-tipo correspondente ao final da construção.

Tabela 59. Propriedades geomecânicas (novas análises)

Solo 1 (Residual Maduro)				Solo 2 (Residual Jovem)			
$\gamma_{nat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (graus)	$\gamma_{nat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (graus)
16	18	7,2	29,3	17	20	24,6	34,6
Grampos (face C)			Grampos (face G) $\cong$ "Tirantes"				
$\phi_{furo}$ (m)	$\phi_{aço}$ (m)	$s_v$ (m)	$\phi_{furo}$ (mm)	$\phi_{aço}$ (m)	$s_v$ (m)	$s_h$ (m)	
0,10	0,022	2,0	0,10	0,022	1,60	2,0	
$\sigma_{aço}$ (MPa)	$q_s$ (kPa)	$s_h$ (m)	$\sigma_{aço}$ (MPa)	$T_i$ (kN)	$L_{livre}$ (m)		
757	118 a 209	2,0	757	100	0		

$\phi_{aço}$ =diâmetro da barra de aço,  $\phi_{furo}$ =diâmetro do furo,  $\sigma_{aço}$ =tensão de escoamento do aço,  $q_s$ =resistência ao arrancamento do grampo,  $T_i$ =carga de incorporação do tirante,  $\gamma_{nat}$ =peso específico natural,  $\gamma_{sat}$ =peso específico saturado,  $c'$ =coesão efetiva,  $\phi'$ =ângulo de atrito efetivo,  $L_{livre}$ =trecho livre do tirante,  $s_v$ =espaçamento vertical,  $s_h$ =espaçamento horizontal.

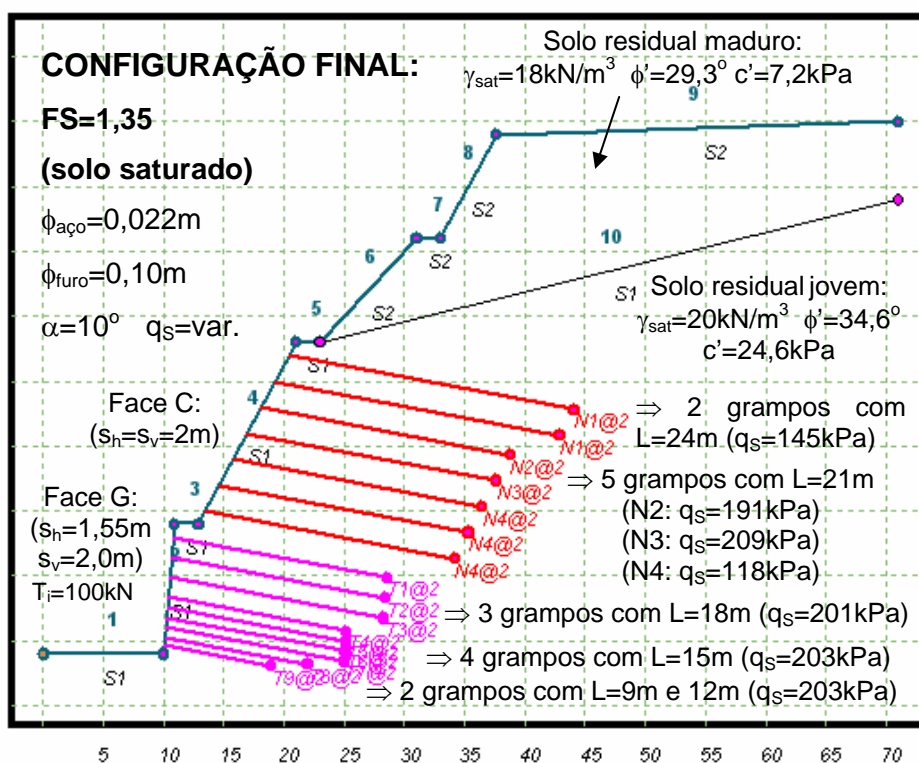


Figura 148. Solução de estabilização ao final da construção (seção-tipo).

A Tabela 60 apresenta um resumo dos estudos realizados e o FS obtido em cada análise. O fator de segurança da solução 11 correspondeu à solução inicial de projeto. Após as modificações citadas anteriormente, o fator de segurança da obra (talude saturado) foi de 1,35.

Tabela 60. Resumo das análises complementares realizadas

Solução	FS global	Descrição
11	1,45 (GL) 1,51 (GF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 grampos (inferiores) com <math>L=18\text{m}</math>, <math>s_h = 2\text{m}</math> e <math>s_v=1,56\text{m}</math>;</li> <li>• 3 grampos (inferiores) com <math>L=15\text{m}</math>, <math>s_h = 2\text{m}</math> e <math>s_v=1,56\text{m}</math>;</li> <li>• 5 grampos (superiores) com <math>L=21\text{m}</math> e <math>s_h=s_v=2,0\text{m}</math>;</li> <li>• 2 grampos (superiores) com <math>L=24\text{m}</math> e <math>s_h=s_v=2,0\text{m}</math>;</li> </ul>
12	1,63	<ul style="list-style-type: none"> <li>• idem a solução 11 com modificação na densidade de grampos na face G;</li> <li>• grampos fixos na face G;</li> </ul>
13	1,64	<ul style="list-style-type: none"> <li>• idem a solução 12 com implementação dos novos valores de <math>q_s</math>, fornecidos pelos ensaios de arrancamento na obra;</li> </ul>
14	1,64	<ul style="list-style-type: none"> <li>• idem a solução 13 com modificações na espessura da camada de solo residual maduro;</li> </ul>
15	1,56	<ul style="list-style-type: none"> <li>• idem a solução 14 com modificações nos parâmetros de resistência dos solos residuais, fornecidos pelos ensaios de laboratório (ensaios triaxiais, CPs saturados);</li> </ul>
16	1,35 (projeto)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• idem a solução 15, com aplicação de uma “carga de incorporação” nos grampos da face G (<math>T_i = 100\text{kN}</math>);</li> </ul>

OBS.: GL=grampos livres; GF=grampos fixos

Observa-se com os valores de fatores de segurança (Tabela 60) a contribuição do aumento na densidade de grampos na face G, na estabilidade global do talude (solução 12). A introdução de mais reforços na face inferior do talude promoveu um pequeno aumento no valor de FS (cerca de 8%). A modificação da geometria, dos valores de resistência ao arrancamento e dos parâmetros de resistência dos solos pouco contribuíram para alterações na estabilidade do maciço, demonstrando a validade das hipóteses empregadas nas análises iniciais, referentes a estes fatores.

A análise que introduziu o efeito da pressão de incorporação nos grampos inferiores (solução 16) reduziu em 15% o valor do FS. Este fato é explicado pela dificuldade do programa computacional em simular o comportamento do grampo, com a aplicação de uma “pré-carga” na sua extremidade. No caso estudado, esta simulação só foi possível com a colocação de “tirantes” na face inferior com trecho livre nulo e com aplicação da carga de incorporação na extremidade ( $T_i=100\text{kN}$ ). Nestas análises, os parâmetros do solo foram semelhantes àqueles utilizados na solução 15, obtidos a partir dos ensaios triaxiais em corpos de prova saturados (Figuras 128 e 129). Os valores de  $q_s$  utilizados foram obtidos de ensaios de arrancamento (Springer, 2006). Não foram considerados fatores de segurança parciais nestes valores.

Uma comparação entre os principais índices de projetos das diversas obras internacionais de solo grampeado listadas no capítulo 3 (Tabelas 19 e 20) e da seção

tipo da obra “Museu 1” (Figura 148), é apresentada na Tabela 61. Com exceção do índice de resistência, todos os outros parâmetros estão de acordo com as recomendações de Bruce e Jewell (1986 e 1987), que refletem o desempenho de obras na França, Inglaterra e Estados Unidos. As diferenças dos resultados apresentados na pesquisa com aqueles reportados por Barley (1993) são justificadas pelos valores de H empregados em cada caso, conforme apresentado no capítulo 3 (Figura 55).

Tabela 61. Comparação dos valores de índices característicos em obras de solo grampeado (grampos injetados)

Referência	Bruce e Jewell (1986 e 1987)	Barley (1993)			“Museu 1”
Tipo de Solo	solos granulares ( $\beta > 80^\circ$ )	---	---	---	residual de gnaiss
Índice de comprimento	0,5 a 0,8	1,00	0,42	1,00	0,6
Índice de contato	0,3 a 0,6	0,36	0,16	0,15	0,5 a 0,8
Índice de resistência	0,004 a 0,008	0,28	0,28	0,20	0,0012 a 0,0016
Índice de desempenho	0,001 a 0,003	---	---	---	0,003
Índice de comprimento= $L_{\text{máx}}/H$ ; Índice de contato (ou aderência)= $(\phi_{\text{furo}} \cdot L)/S_v \cdot S_h$ ; Índice de resistência= $(\phi_{\text{aço}})^2 / S_v \cdot S_h$ ; Índice de desempenho= $\delta_h^{\text{máx}}/H$					

Os parâmetros de projeto indicados na Figura 148 correspondem à solução final do grampeamento, a qual indica a geometria final do talude do “Museu 1”. Estes parâmetros são apresentados, de forma resumida, na Tabela 62 e comparados com as recomendações do projeto Clouterre (1991). Nota-se uma diferença nos valores do comprimento do grampo (L) e densidade do grampeamento, pelo fato de que as observações do projeto Clouterre (1991) são associadas a escavações verticais ( $0^\circ \leq \eta \leq 10^\circ$ ) em solos homogêneos.

Tabela 62. Comparação dos valores típicos de projetos em estruturas de solo grampeado

Parâmetro	Clouterre (1991)	“Museu 1”
Comprimento dos grampos (L)	0,8 a 1,2H	0,4 a 0,6H
Número de grampos por m <sup>2</sup> de paramento	0,15 a 0,40	0,25 a 0,32
Diâmetro dos grampos	20 a 25mm	22mm
Resistência à tração da barra de aço ( $T_G$ )	100 a 600kN	247,8kN
Densidade do grampeamento (d)	0,13 a 0,60	0,07 a 0,21
Ângulo de inclinação de grampo ( $\alpha$ ) com a horizontal	0° a 20°	10°
Inclinação do paramento com a vertical ( $\eta$ )	0° a 10°	15° a 30°
Inclinação da superfície do terreno ( $\theta_T$ )	0° a 5°	5°

- **Avaliação da contribuição da sucção na estabilidade do talude:**

Um breve estudo sobre a contribuição da parcela de sucção na estabilidade da escavação grampeada foi realizado a partir da estimativa de valores de sucção de campo, da massa de solo grampeado. A análise paramétrica consistiu em determinar, a partir da solução final do projeto (Figura 148), fatores de segurança globais pelo método de Bishop Simplificado, variando-se o valor inicial de sucção no campo. Na ausência de medidas de sucção de campo ou da determinação do perfil de umidade do solo, estimou-se, para a condição natural, valores de sucção inicial (médios) de 100, 150, 200 e 300kPa. Estes valores foram considerados constantes ao longo de cada camada de solo (residual jovem e maduro). No período da estação seca, esta consideração superestima o valor da sucção para pequenas profundidades.

Para a avaliação da estabilidade do maciço grampeado não foi considerado o valor de poropressão por rede de fluxo, sendo o valor da sucção considerado no valor da coesão total. Os valores de FS assim obtidos indicam a possível condição de estabilidade da encosta (não-saturada) para o caso da estação seca (período sem chuvas), com nível d'água hidrostático profundo (inferior a cota +25,00m). Ressalta-se que as medições realizadas com os inclinômetros na estação seca indicaram que os torpedos e cabos não se apresentavam umedecidos pelo contato com a água. Este fato foi observado até a profundidade final dos tubos.

Para o caso de uma análise de estabilidade crítica faz-se necessário considerar a variação de poropressão com o avanço da frente de saturação, associada a um processo de infiltração de água no talude, decorrente de período de chuvas intensas. Esta análise não fez parte do escopo desta pesquisa. Como sugestões futuras, novos estudos poderão ser realizados implementando o processo de fluxo saturado/não saturado passíveis de ocorrer na encosta, por meio de análises numéricas mais sofisticadas. Vale lembrar que estas análises são importantes visto que a maioria dos escorregamentos de solo no Rio de Janeiro está diretamente ligada à ocorrência de precipitações pluviométricas de grande intensidade.

Admitindo-se que, para a condição natural, os materiais apresentaram graus de saturação abaixo de 80% (ar contínuo), os parâmetros de resistência dos solos foram determinados em termos de tensões totais (Lambe e Whitman, 1969) visto que a definição de tensões efetivas é duvidosa. Como hipótese simplificadora, admitiu-se que o ângulo de atrito do solo pouco se modifica ( $\phi \cong \phi'$ ) e que a coesão aparente (total) é função da coesão efetiva e do nível de sucção apresentado pelo material (equação 13) (Fredlund e Rahardjo, 1993). Esta premissa de cálculo pode ser confirmada na

comparação dos ensaios de laboratório em corpos de prova na umidade natural e previamente saturados.

Os valores dos parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas ( $c'$  e  $\phi'$ ) foram obtidos dos ensaios triaxiais drenados (Figuras 128 e 129). O ângulo  $\phi^b$  foi considerado variável, conforme o nível de sucção apresentado e foi estimado a partir de valores típicos da razão  $\phi^b/\phi'$  apresentados por De Campos e Delgado (1995), para solos residuais (Figura 108). Idealmente, os valores estimados da razão  $\phi^b/\phi'$  devem ser obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada. Um resumo com as análises realizadas é apresentado na Tabela 63. Os fatores de segurança globais calculados para os diferentes níveis de sucção de campo estão ilustrados na Figura 149.

Tabela 63. Resumo dos parâmetros e resultados das análises de estabilidade considerando o efeito da sucção

Sucção $u_a - u_w$ (kPa)	Parâmetros dos Solos						FS
	Residual Maduro			Residual Jovem			
	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$	c (kPa)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$	c (kPa)	
0	18	29,3°	7,2	20	34,6°	24,6	1,35 (solo saturado)
100	16	29,3°	15,4	17	34,6°	34,3	1,44
150			19,5			39,1	1,48
200			23,6			44,0	1,52
300			31,8			53,7	1,75

Obs: Análises de estabilidade, empregando parâmetros do solo na condição de umidade natural (cisalhamento direto) forneceram FS=1,59.

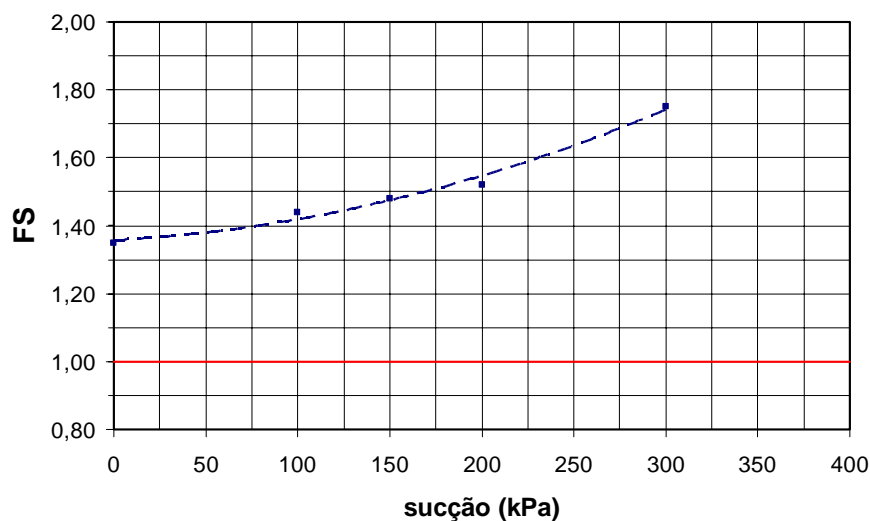


Figura 149. Fatores de segurança globais (FS) do "Museu 1" para os diferentes níveis de sucção de campo.

Como era de se esperar, observa-se na Figura 149 que os valores dos fatores de segurança aumentam com o acréscimo da parcela de sucção, responsável pelo aumento da resistência ao cisalhamento do solo não-saturado. Os resultados indicam que o talude apresenta um fator de segurança aceitável ( $FS=1,35$ ), mesmo para o caso de não haver contribuição da parcela de sucção (solo saturado). Para o caso da encosta apresentar um valor médio de sucção de 100kPa (condição não-saturada), percebe-se um aumento no FS de aproximadamente 6,6% em comparação à condição saturada. Ressalta-se que para este nível de sucção, o fator de segurança já se situa próximo a 1,50, valor tipicamente adotado para obras de contenção permanentes.

Para o caso de uma estimativa de sucção no campo mais elevada (300kPa), há um aumento maior (de  $\approx 30\%$ ) na condição de estabilidade do talude. Este resultado indica a importância de se considerar a contribuição da sucção nas análises de estabilidade de taludes naturais em solos tropicais. Em muitos casos esta consideração pode acarretar projetos menos onerosos. Porém, ela não é prática comum. Isto ocorre porque os ensaios de resistência com sucção controlada e de determinação da curva característica, necessários aos estudos de estabilidade em solos não-saturados, ainda são pouco empregados na prática da engenharia.

Na Tabela 63 também está indicado o fator de segurança obtido para análises complementares da estabilidade com amostras na umidade natural (cisalhamento direto). O valor de  $FS=1,59$  é cerca de 17% superior às análises com solo saturado, mostrando a influência da sucção na estabilidade do maciço grampeado.

Os valores dos esforços axiais máximos em cada grampo instrumentado, foram obtidos para a condição de equilíbrio-limite. A Figura 150 apresenta os valores de tração máxima nos grampos, para os níveis de sucção estudados (Tabela 63).

Na Figura 150 nota-se uma pequena variação nos valores dos esforços axiais nos reforços com o aumento da sucção (até  $u_a-u_w=200\text{kPa}$ ). Esta observação está associada à pequena variação do FS, comentada anteriormente (não há variações significativas no comprimento do reforço na zona passiva, até o nível de sucção de 200kPa).

A partir dos valores ilustrados na Figura 150, observa-se que os grampos instrumentados que mais contribuem para a estabilidade do maciço grampeado são aqueles da face C (5ª linha do talude superior) e G (1ª linha do talude inferior), posicionados nas cotas +44 e +38, respectivamente. Nota-se ainda que os valores de tração máxima dos reforços estão bem distantes do valor da carga de escoamento da barra de aço ( $T_{\text{escoamento}}=247,8\text{kN}$ ). As trações máximas nos grampos C67 e C69 correspondem a 44% do valor de  $T_{\text{escoamento}}$ , para a condição saturada. Observa-se

ainda nesta figura que 3ª linha de reforços (grampos C37 e C39) não oferece contribuição à estabilidade do talude para sucções mais elevadas. Isto ocorre porque, para o nível de sucção de 300kPa, a superfície mais crítica não intercepta estes reforços.

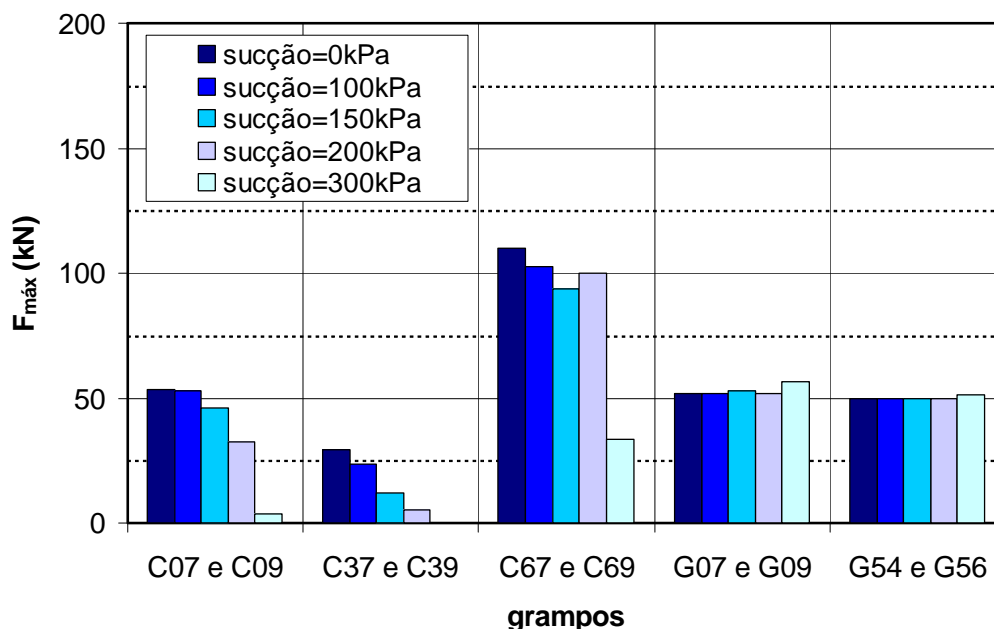


Figura 150. Esforços axiais máximos em cada grampo instrumentado para os diferentes níveis de sucção de campo.

## 6.2.

### Resultados da instrumentação e monitoramento

São apresentados, a seguir, os resultados do programa de monitoramento e instrumentação geotécnica do talude em solo grampeado. Os procedimentos de instalação dos instrumentos utilizados, assim como, a metodologia empregada durante as leituras foram descritos no item 5.3. Os resultados fornecidos pelos instrumentos são apresentados separadamente. Uma análise conjunta e discussão de todos os resultados são realizadas posteriormente no item 6.3.

#### 6.2.1.

##### Deslocamentos horizontais no talude fornecidos pelos inclinômetros

Foram realizadas leituras de deslocamentos horizontais em dois tubos de inclinômetros, denominados I1 (cota +53) e I2 (cota +39), cujas localizações estão apresentadas na Figura 131. As leituras foram efetuadas em duas direções denominadas direção principal e direção secundária (Figura 133) e foram realizadas



durante todo o período construtivo e após o término da obra. A distância do tubo (na boca do furo) até a face da escavação foi de 1,0m. O período de monitoramento com os inclinômetros foi de 14 de Abril de 2004 até 10 de Janeiro de 2007, totalizando 53 leituras do inclinômetro I1 e 39 leituras do inclinômetro I2. Em geral, a frequência de leituras foi de 2 a 4 dias durante a escavação e de 15 a 30 dias, após o grampeamento do maciço.

- **Deslocamentos horizontais na direção principal:**

Os deslocamentos horizontais, fornecidos pelos inclinômetros I1 e I2, na direção principal de movimentação do talude, são indicados nas Figuras 151, 152 e 153. Os resultados fornecidos pelo inclinômetro I1 foram obtidos segundo as hipóteses de cálculo apresentadas no item 5.3.1, tendo em vista a perfuração do tubo na cota +32,93, em 21 de Junho de 2004. No intervalo de monitoramento anterior a esta data, os deslocamentos indicados nas Figuras 151 (hipótese 01) e 152 (hipótese 02) são os mesmos. Em todos os gráficos são indicadas as localizações dos grampos instrumentados e das caixas de “tell tales” na face da escavação.

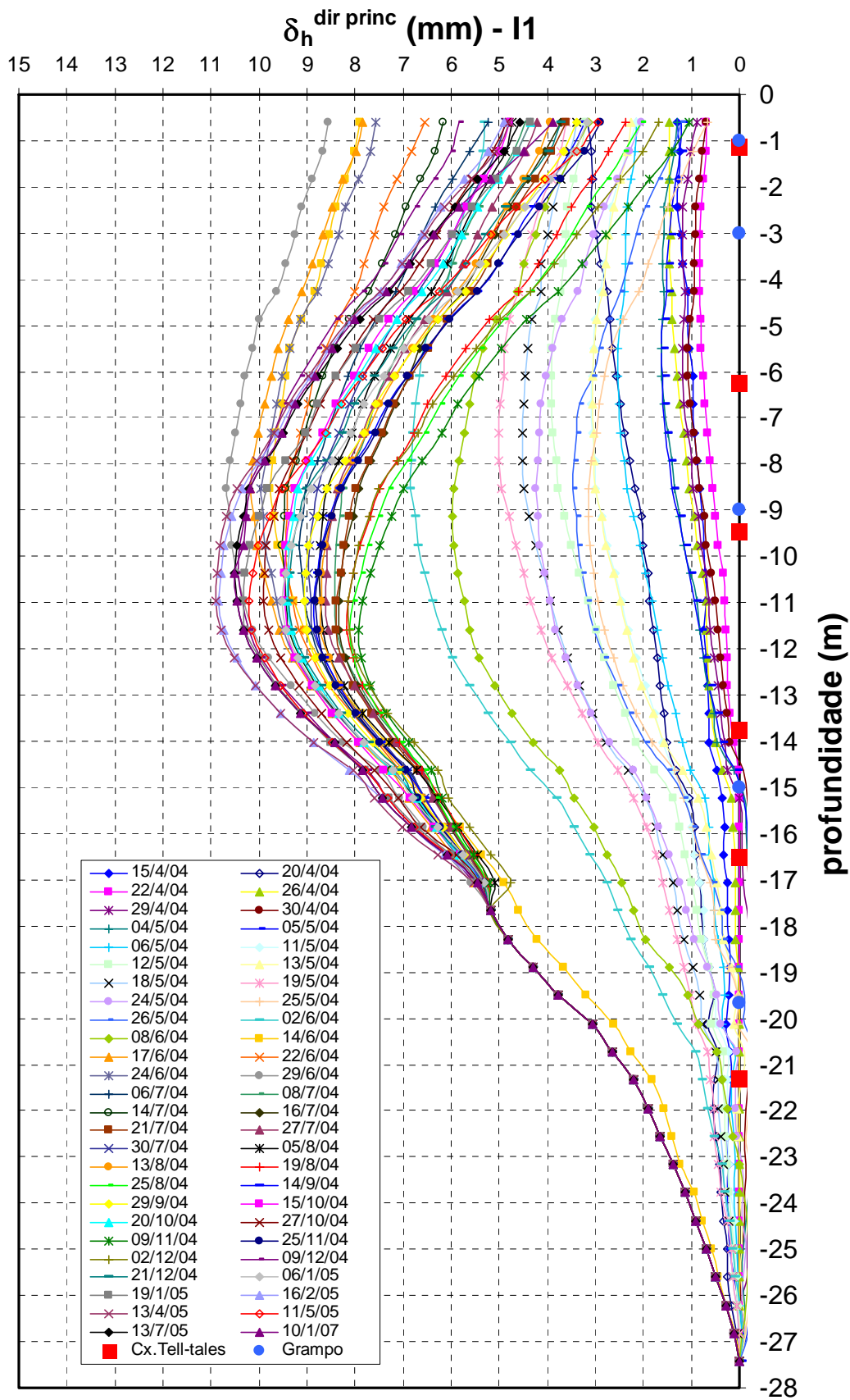


Figura 151. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclinômetro I1 - Hipótese 1.

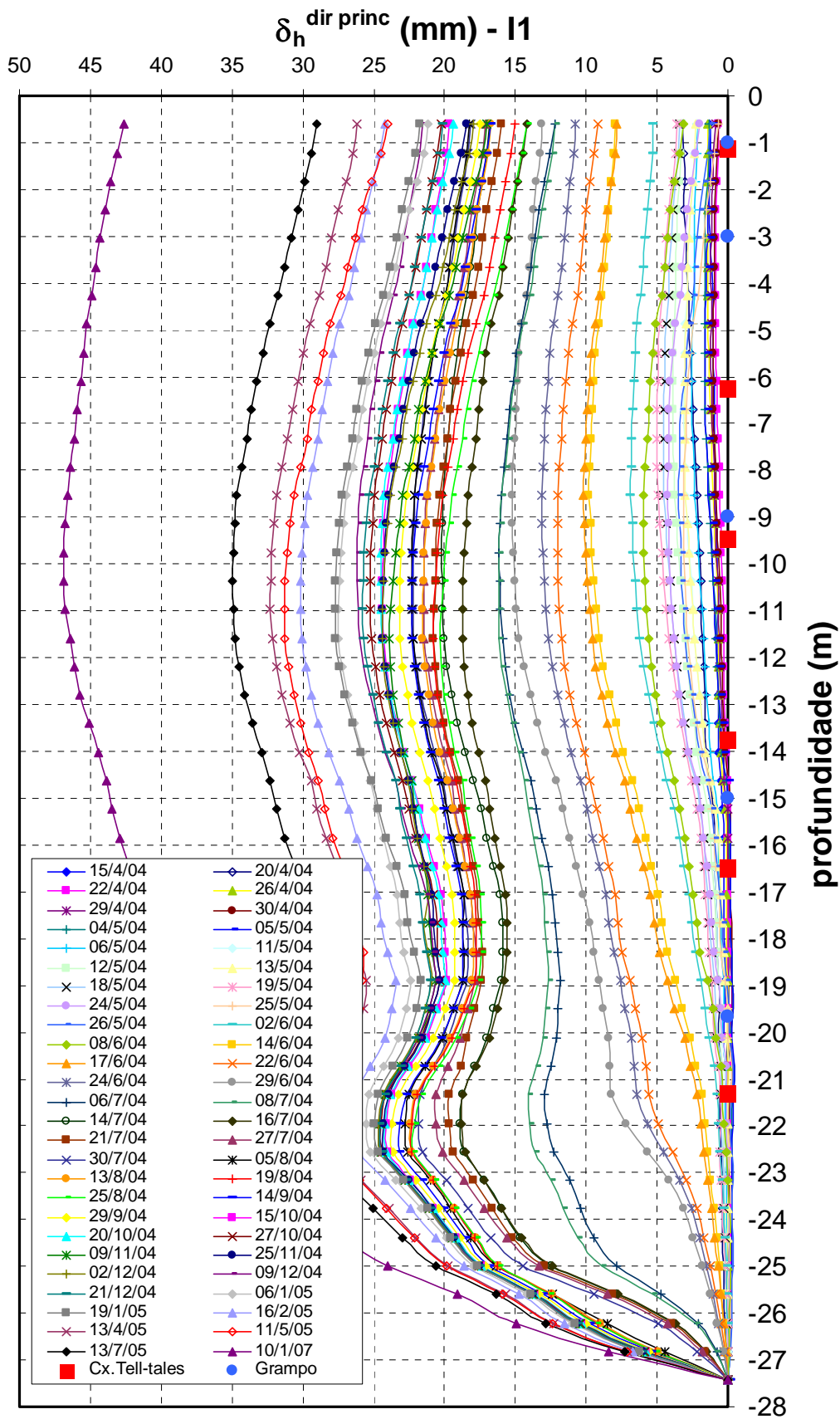


Figura 152. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclínômetro I1 - Hipótese 2.

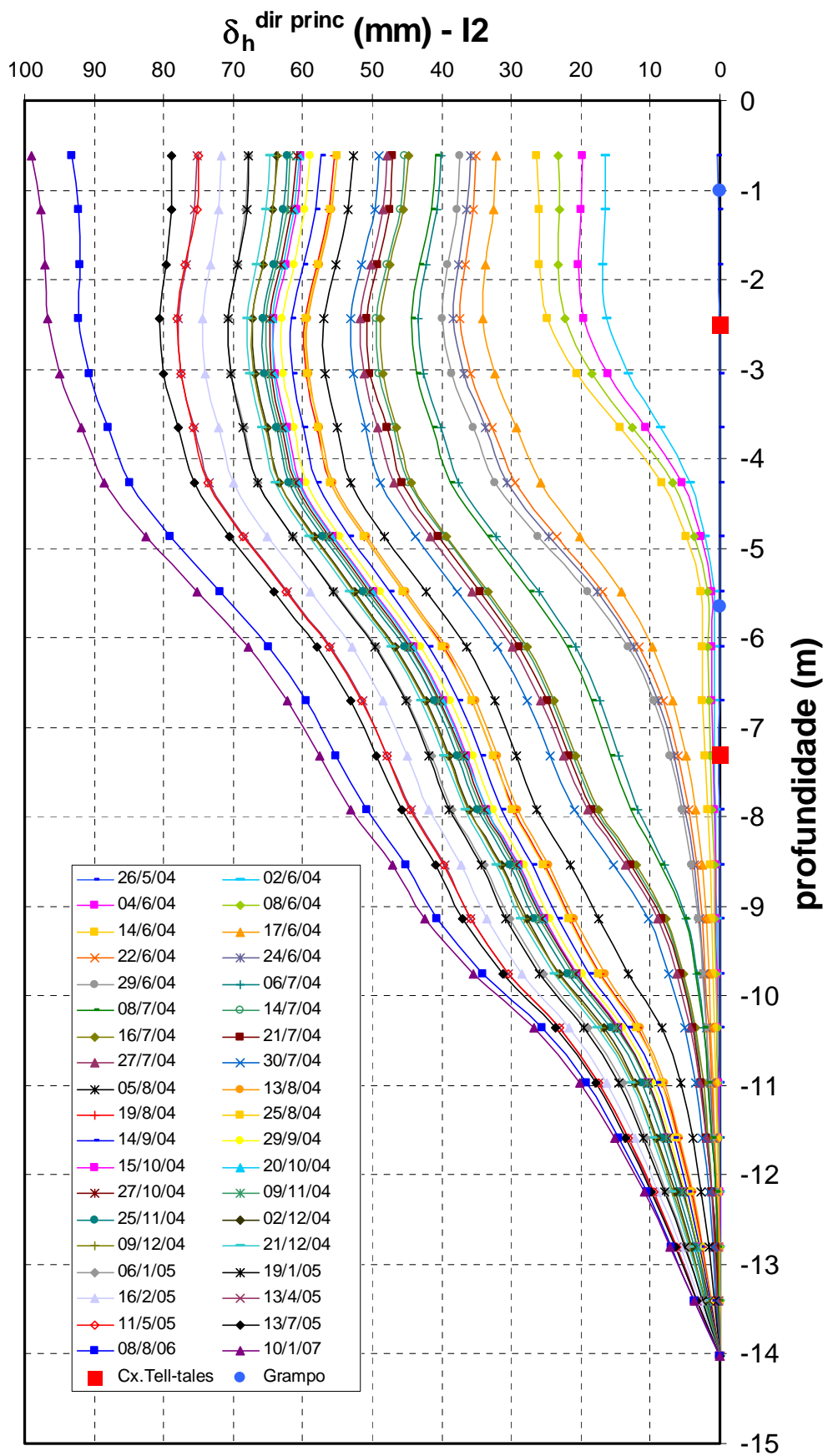


Figura 153. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclínômetro I2.

Os resultados apresentados pelo inclinômetro I1 (Figuras 151 e 152) indicam um bom funcionamento do inclinômetro e ilustram que há um aumento dos deslocamentos horizontais, conforme o avanço da escavação e após o término da obra (12/08/2004). A magnitude dos deslocamentos obtidos pela hipótese 02 (admitindo-se o comportamento do talude como bloco rígido) foram superiores a hipótese 01, que considerou constantes os deslocamentos de I1 abaixo do ponto perfurado (profundidade superior a 17,68m).

Para o caso do inclinômetro I1 (hipótese 01), o deslocamento horizontal máximo na direção principal foi de 10,9mm na data de 13 de Abril de 2005 (Figura 151). A magnitude dos deslocamentos horizontais obtidos pela hipótese 02 (Figura 152) foi maior, sendo o valor máximo encontrado na última data de medição apresentada (10/01/2007) e equivalente a 46,9mm. Vale ressaltar que as medidas determinadas por estas hipóteses definem um limite inferior e superior para a avaliação dos deslocamentos após a perfuração do tubo do inclinômetro. A diferença nos resultados chega a aproximadamente 77% do valor fornecido pela hipótese 02, na última data de medição de I1 (10/01/2007).

É interessante notar nas Figuras 151 e 152 que, para as hipóteses admitidas, os deslocamentos horizontais foram máximos na profundidade média de escavação de 26,0m (cota +43,00) ou  $0,65H$  (onde  $H=40m$  é a altura total da escavação). Este valor equivale a profundidade do tubo do inclinômetro I1 de 10,0m ou  $0,42H_{SG}^I$  (sendo  $H_{SG}^I=24,0m$  a altura do talude grampeado onde está instalado o inclinômetro I1). Adicionalmente, percebe-se que a posição dos deslocamentos horizontais máximos de I1 é próxima à cota de instalação dos grampos instrumentados C67 e C69 e da caixa de "tell tales" 03. Em linhas gerais, pode-se se dizer que esta se encontra no terço central da escavação na face C.

Particularmente, na Figura 152, ressalta-se que há uma pequena mudança no padrão dos deslocamentos na profundidade maior que 17,68m. Isto se deveu à hipótese de cálculo dos deslocamentos que compatibilizaram os valores de  $\delta_h$  fornecidos pelo I2 com aqueles obtidos pelo I1.

A Figura 153 apresenta os deslocamentos horizontais na direção principal, fornecidos pelo inclinômetro I2. Os resultados também indicaram o bom funcionamento do equipamento, sendo as leituras crescentes com o avanço da escavação.

Os valores de deslocamentos apresentados pelo inclinômetro I2 mostram uma mudança no padrão de comportamento do talude inferior, sendo os valores máximos de deslocamentos bem superiores àqueles fornecidos pelo I1 e mais próximos ao topo da escavação, diminuindo de valor com a profundidade. Os resultados indicaram uma

movimentação horizontal máxima de 99,0mm, para a última data de medição (10/01/2007). Conforme apresentado na Figura 153, os deslocamentos máximos, em geral, foram observados na profundidade do tubo do inclinômetro I2 de 2,5m ou  $0,25H_{SG}^2$  (sendo  $H_{SG}^2=10,0m$  a altura do talude grampeado onde está instalado o inclinômetro I2. Considerando-se a altura total da escavação (H), a posição dos deslocamentos máximos equivale a aproximadamente  $0,81H$ . Em escavações verticais os deslocamentos seriam máximos no topo do talude.

A diferença no padrão de comportamento do I1 e I2 está associada ao processo executivo e à geometria do talude. Com o avanço da escavação, nota-se que o tubo do inclinômetro I1 fica mais distante da face do talude, já que a face superior grampeada possui inclinação menos acentuada ( $\beta=60^\circ$ ) que a face inferior ( $\beta=85^\circ$ ). Desta forma, conclui-se que as deformações no interior do maciço grampeado diminuem com o aumento da distância da face da escavação.

- **Deslocamentos horizontais na direção secundária:**

A instrumentação geotécnica com inclinômetros também forneceu deslocamentos horizontais na direção secundária. Analogamente à direção principal, os deslocamentos fornecidos pelo I1 foram obtidos segundo duas hipóteses de cálculo. As Figuras 154 e 155 apresentam os deslocamentos horizontais obtidos para o I1, segundo as duas hipóteses de cálculo. A Figura 156 mostra os resultados da movimentação horizontal do talude, fornecidos pelo I2. Nestas figuras são indicadas as localizações das obras “Museu 1” e “Museu 2” (Figura 133)









Os deslocamentos máximos na direção secundária, obtidos pelo inclinômetro I1, foram de 4,0mm e 12,1mm para as hipóteses 01 (Figura 154) e 02 (Figura 155), respectivamente. No caso do inclinômetro I2, o valor máximo foi de 9,2mm (Figura 156). Em ambos os equipamentos, as maiores leituras foram obtidas no topo da escavação, próximo aos grampos instrumentados G07 e G09 e à caixa de tell tales 05.

As Figuras 154 a 156 indicaram que deslocamentos horizontais na direção secundária foram inferiores àqueles fornecidos anteriormente pela direção principal. Após o término da obra (13/08/04), os valores dos deslocamentos na direção secundária (valores positivos) tenderam a aumentar. Para a última medição de I1, corresponderam à cerca de 35% e 23% dos deslocamentos na direção principal conforme a hipótese 01 e 02, respectivamente. Para o inclinômetro I2 a diferença alcançou um patamar menor de, aproximadamente 8%. O aumento observado pode estar associado ao avanço da escavação do talude vizinho (“Museu 2”) já que a movimentação lateral do talude grampeado ocorre, predominantemente, no sentido positivo dos gráficos (Figuras 154 a 156), indicando uma possível, e importante, contribuição da escavação vizinha no comportamento da obra. Deste modo, é correto afirmar que, com o avanço da escavação vizinha, o vetor resultante dos deslocamentos horizontais do talude tende a seguir a direção NW-SE, segundo a orientação apresentada na Figura 133.

### **6.2.2. Deslocamentos horizontais no talude grampeado fornecidos pelos “tell tales”**

Para o monitoramento dos deslocamentos horizontais de pontos específicos de uma mesma cota, foram instaladas na face do talude, 6 caixas com 4 “tell tales” cada, conforme descrito no item 5.3.2. Cada “tell tale” é formado por um tubo de revestimento (plástico ou de PVC) em cujo interior passa um cabo de aço. Os comprimentos de cada cabo de aço foram de 1,5m, 7,0m, 14,0m, e 28,0m. As Figuras 136 e 137 apresentaram a configuração das caixas e os detalhes da instalação do instrumento, respectivamente.

As leituras dos “tell tales” das 6 caixas foram realizadas durante todo o processo executivo e após o término da obra. O período de monitoramento foi de 02 de Abril de 2004 até 09 de Novembro de 2006. Foram realizadas 62 leituras, com periodicidade média de 2 a 4 dias durante a escavação e de 15 a 30 dias, após o grampeamento do maciço.

As caixas de “tell tales” estão posicionadas na face da escavação, nas profundidades médias de escavação de 17, 22, 25, 30, 32 e 37m (Figura 132). Um

resumo contendo as informações do projeto de instrumentação com “tell tales” encontra-se na Tabela 57. O acesso às caixas de “tell tales” foi feito por meio de escada (barras de aço) chumbada à face do talude. Foi necessária a utilização de equipamento de segurança (cinto de alpinista, bota e capacete) e aprendizado de técnicas de escalada para a realização das leituras.

As Figuras 157 e 158 apresentam os resultados típicos registrados pelos “tell tales” mais próximos do topo da escavação, nas faces C e G, respectivamente (caixas 1 e 5). Os demais resultados encontram-se no Apêndice 03 (Figuras A28 a A33). Nestas figuras também está indicado o avanço da escavação, correspondente a data de leitura dos “tell tales” de cada caixa. O fim da escavação correspondeu a data de 12 de Agosto de 2004. Neste dia a profundidade da escavação foi de, aproximadamente, 40m. Após esta data deu-se o início da execução de cavas de fundações rasas (cerca de 1m de profundidade) e da escavação da obra vizinha (“Museu 2”). A execução das escavações para as fundações foi de 09 de Novembro de 2004 até 19 de Janeiro de 2005. A duração da escavação vizinha foi de 13 de Agosto de 2004 até 22 de Março de 2005.

A primeira leitura realizada foi na data de 02 de Abril de 2004, quando a altura escavada, em solo grampeado, era de  $H_{escav}^{SG} = 5,55m$ .

De maneira geral, os resultados apresentados nas Figuras 157 e 158 indicaram que os deslocamentos dos “tell tales” aumentaram com o avanço da escavação. Não houve estabilização dos deslocamentos com o término da obra (12/08/04), sugerindo que há influência da escavação vizinha na acomodação da massa de solo reforçada.

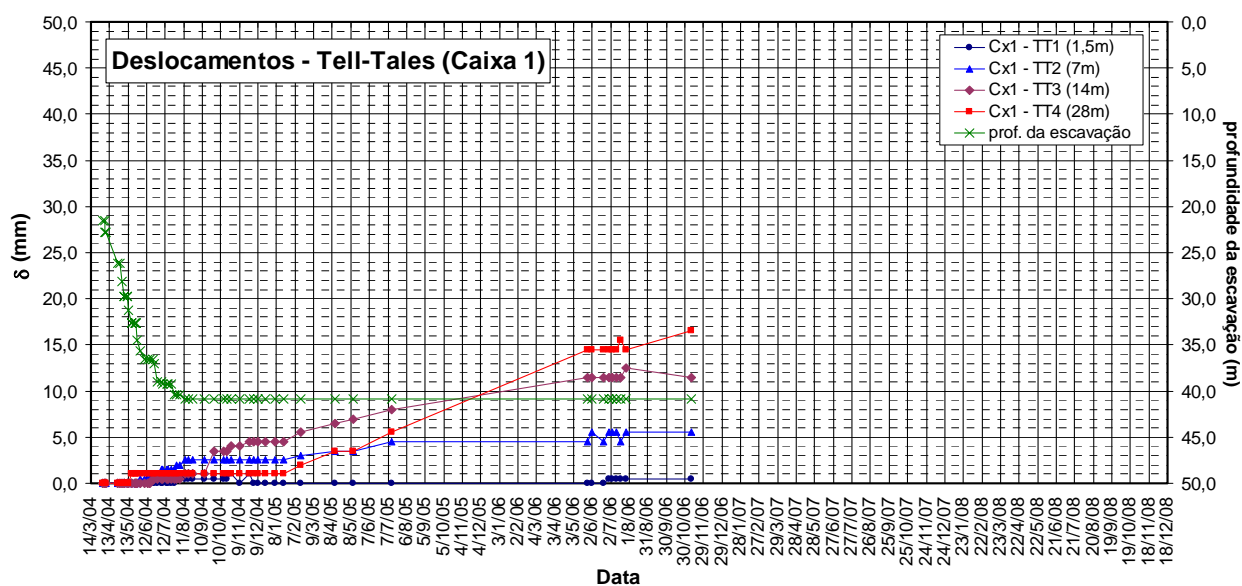


Figura 157. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” da caixa 1 - Face C.

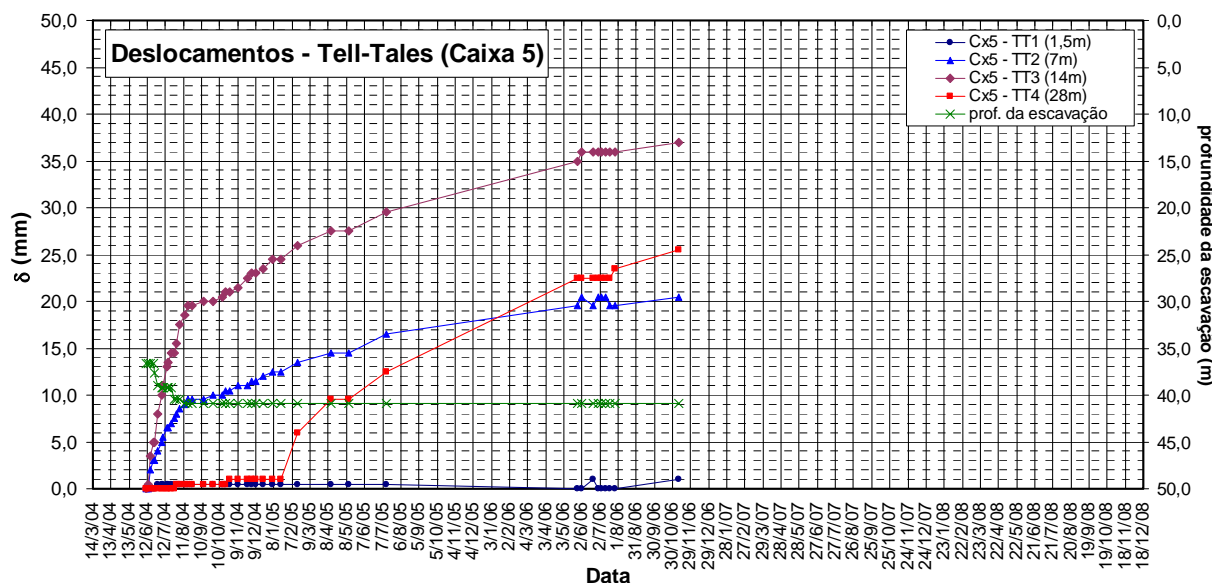


Figura 158. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” da caixa 5 - Face G.

Observando-se as curvas de deslocamentos (Figura 157), ficou evidente que a caixa 1 (face C - superior) apresentou uma mudança no padrão de deslocamentos a partir da data de 19 de Janeiro de 2005, quando houve um aumento da taxa de crescimento dos deslocamentos fornecidos. Neste período, a cota da escavação vizinha foi de +23,00m. Este padrão de comportamento também foi observado nas caixas 2 e 4 da mesma face e na caixa 5 (face G).

Constatou-se também que os “tell tales” de 1,5m de comprimento apresentaram valores baixos de deslocamentos, sem variações significativas durante o monitoramento. Este fato também foi observado no primeiro “tell tale” (1,5m) das caixas 2, 3 e 6 (Figuras A29, A30 e A33), onde o valor de deslocamento foi sempre inferior a 1,5mm. Este comportamento indica que os “tell tales” curtos foram insensíveis ao processo executivo.

Com relação ao desempenho do monitoramento geotécnico com os “tell tales”, as Figuras A28 a A33 (Apêndice 03) ilustram que as leituras de todos os “tell tales” são consistentes entre si. Os maiores deslocamentos são aqueles fornecidos pelos “tell tales” das caixas 4 e 5, que estão posicionadas próximas à cota +39,00 (Figura 132). Nesta região, os resultados da instrumentação geotécnica, obtidos com inclinômetros, forneceram os maiores deslocamentos horizontais com a profundidade. Os deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” das caixas 4 e 5 foram, respectivamente, 40,5mm (TT4-28m) e 37,0mm (TT3-14m). A interpretação dos deslocamentos de cada “tell tale” (Apêndice 03) será discutida adiante, no item 6.3.1.

### 6.2.3. Esforços de tração nos grampos

O monitoramento dos esforços axiais nos reforços foi realizado em 10 grampos instrumentados, nas faces C e G, divididos em duas seções de estudo (Colunas A e B), distantes entre si de 4m. As Figuras 131 e 132 indicam a posição dos reforços no maciço grampeado e a Tabela 58 apresenta um resumo do processo executivo dos mesmos. O posicionamento dos “strain-gauges” ao longo do elemento de reforço está ilustrado na Figura 138. Basicamente, os extensômetros foram colados a cada 2 a 3m, com maior concentração na região onde os esforços são maiores.

Os esforços de tração nos grampos foram obtidos para 54 registros de campo, de 18 de Março de 2004 a 27 de Julho de 2006. Para cada data considerada, a carga axial foi calculada pela equação (24). Os procedimentos de preparação das barras instrumentadas e os detalhes do monitoramento geotécnico com “strain-gauges” estão detalhados no item 5.3.3.

Os resultados típicos da instrumentação dos grampos com “strain-gauges” são apresentados nas Figuras 159 e 160. Os gráficos representam à carga axial mobilizada vs. data de medição, para os grampos superiores (faces C e G). As leituras correspondem ao conjunto de valores fornecidos pelo “strain-gauge” SG1 (face C e G, colunas A e B), que está a 3m da face da escavação. Os resultados obtidos a partir dos outros extensômetros elétricos, em todos os grampos instrumentados, estão no Apêndice 04 (Figuras A34 a A52). O valor de  $x$  nestes gráficos equivale a distância do “strain-gauge” à face da escavação.

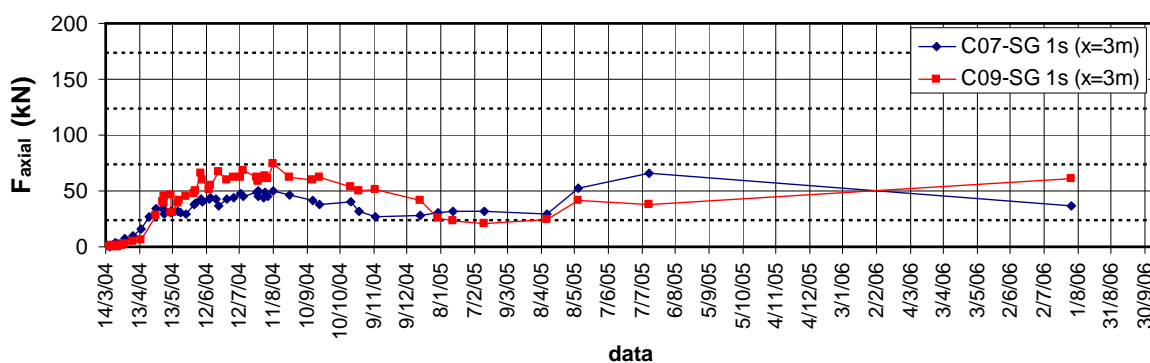


Figura 159. Força de tração nos grampos C07 e C09 a 3m da face - SG1s.

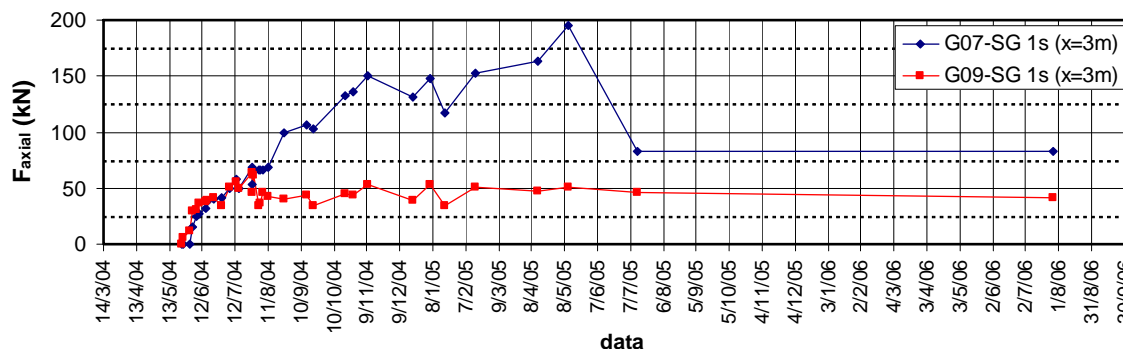


Figura 160. Força de tração nos grampos G07 e G09 a 3m da face - SG1s.

Os resultados dos esforços de tração vs. datas de medição (Figuras 159 e 160) indicaram que as cargas mobilizadas nas barras aumentaram progressivamente com o avanço da escavação. A variação das leituras de  $F_{axial}$  vs. data de medição indica a elevada precisão dos “strain-gauges”. Após o término do talude em solo grampeado (12 de Agosto de 2004), observou-se uma redução das cargas apenas na face superior. O aumento das solicitações, a 3m da face, nos grampos G07 e G09 pode ser atribuído à acomodação do maciço grampeado e ao desconfinamento lateral provocado pela escavação vizinha (“Museu 2”). Este comportamento foi verificado em todos os outros grampos da face inferior, cujos resultados encontram-se no Apêndice 04. O efeito das escavações é mais significativo nos grampos da face G.

A magnitude das forças de tração, a 3m da face, no grampo G07 é superior ao grampo G09 (Figura 160). A diferença alcança um valor máximo de 144kN na data de 11/05/2005, reduzindo-se para 42kN ao final do período de monitoramento. Para a face C (superior), os valores médios de  $F_{axial}$  apresentaram a mesma ordem de grandeza. Em ambas as faces, verificou-se uma tendência de estabilização da carga axial, a partir da data de 13/07/2005, 11 meses após o término da obra e 04 meses após cessar a escavação da obra vizinha (“Museu 2”). Esta tendência é comprovada em todos os outros grampos instrumentados (Figuras A34 a A52 do Apêndice 04).

O desempenho da instrumentação geotécnica com extensômetros elétricos foi considerado bastante satisfatório. Do total de 74 “strain-gauges”, houve uma perda de 4% na introdução das barras no talude e de 11% após 2 anos e 4 meses de monitoramento (apesar de todos tomados para a confecção e instalação das barras com “strain-gauges” no maciço). A perda total de 15% de “strain-gauges” é atribuída à má funcionabilidade (instabilidade) ou ausência de leituras dos mesmos.

No processo de instalação dos reforços as perdas podem ocorrer por choques da barra de aço contra o terreno, flambagem excessiva da barra ou danos mecânicos devido ao processo de injeção. A ausência de leituras de alguns “strain-gauges”

(Figuras A34 a A52), desde o início do monitoramento está correlacionada com estes fatores.

Já durante o monitoramento, as perdas podem estar associadas a um possível contato de água e umidade com os circuitos elétricos e/ou perda de aderência do extensômetro ou terminais a barra de aço. Estes fatores podem explicar o mau funcionamento dos “strain-gauges” SG0s, SG2s, SG3s e SG4s do grampo G09, conforme ilustram as Figuras A46 a A49.

Durante quase todo o período de monitoramento, o comportamento dos grampos instrumentados indicaram que as forças de tração alcançaram valores máximos inferiores a 100kN na Face C e a 200kN na Face G (Figuras A34 a A52 - Apêndice 04). Estes valores correspondem a cerca de 40 e 80%, respectivamente, da força de escoamento do aço ( $T_{\text{escoamento}}$ ).

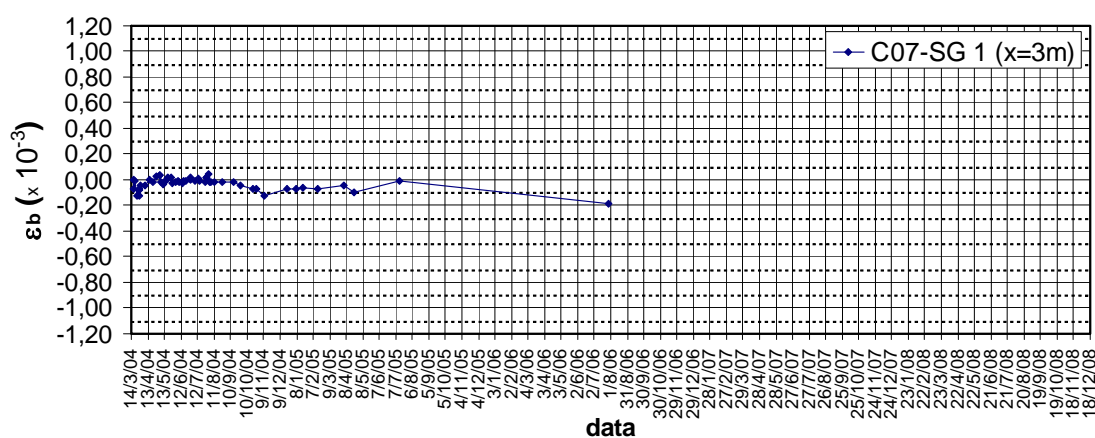
Uma análise mais detalhada do comportamento dos grampos durante a construção e em serviço será descrita no item 6.3.2.

#### **6.2.4. Momentos fletores nos grampos**

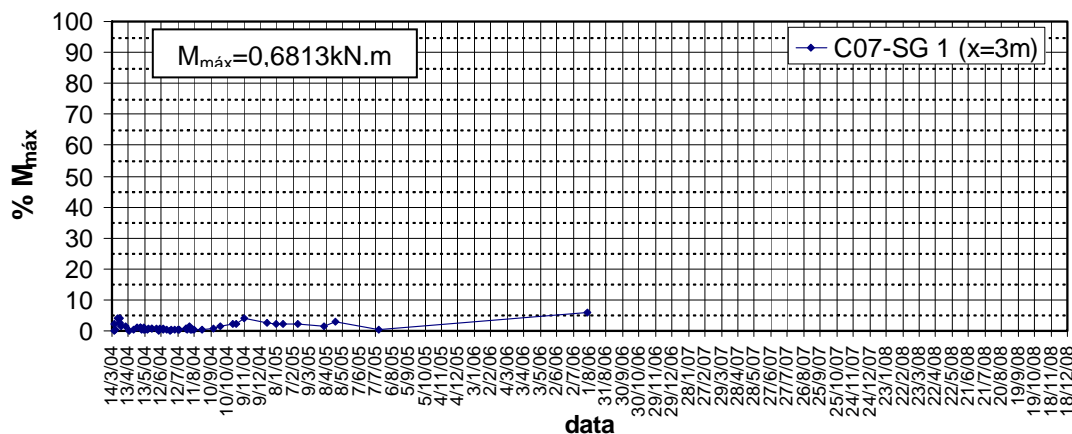
A verificação da mobilização das barras instrumentadas à flexão foi realizada pelas leituras de “strain-gauges” diametralmente opostos, posicionados nos grampos C07 (face superior) e G07 (face inferior). O período de leituras foi o mesmo do monitoramento dos esforços axiais, sendo o procedimento de coleta e interpretação dos dados exposto no item 5.3.3. Os cálculos do momento fletor ( $M$ ) e do momento fletor máximo ( $M_{\text{máx}}$ ), em cada ponto da barra, foram obtidos pelas equações (30) e (31), respectivamente. O momento máximo pode ser entendido como o momento atuante na barra cuja face tracionada atinge o limite de escoamento do aço. As deformações resultantes da flexão da barra ( $\varepsilon_b$ ) foram calculadas pela equação (29).

As Figuras 161 e 162 apresentam resultados típicos do monitoramento dos momentos fletores e deformações resultantes, para os grampos C07 e G07, a 3m da face da escavação. Os demais resultados podem ser visualizados no Apêndice 05 (Figuras A53 a A67). Pode-se observar que as deformações resultantes da flexão dos grampos são pequenas (Figuras 161a e 162a), pois a mobilização do momento fletor apresenta valores baixos (Figuras 161b e 162b). Durante a escavação, o momento fletor no grampo C07 é inferior a 2% do momento máximo, equivalente a 0,6813kN.m. Após o grampeamento do terreno e início da escavação vizinha, o valor de  $M$  é de 6% do momento fletor máximo. No caso do grampo da face inferior (G07), os valores

encontrados são superficialmente mais elevados. O momento fletor, neste caso, é menor que  $10\%M_{m\acute{a}x}$ , durante a construção, alcançando um valor máximo de  $15,7\%M_{m\acute{a}x}$  em 16 de Fevereiro de 2005. Estes resultados apresentam consistência, pois a mobilização dos momentos fletores é diretamente proporcional às deformações ocorridas na massa de solo grampeado. Na região próxima ao SG1 (3m da face da escavação), os maiores deslocamentos são aqueles fornecidos pelo inclinômetro I2 (face G). Além disto, é de se esperar que nesta região há uma maior mobilização de esforço axial do grampo, confirmado pelos resultados apresentados nas Figuras 159 e 160 (grampo C07 e G07). A 3m da face da escavação, os valores de tração no grampo G07 são, visivelmente, superiores aos do grampo C07.



(a) Deformações devido à flexão do grampo



(b) Mobilização de momento fletor

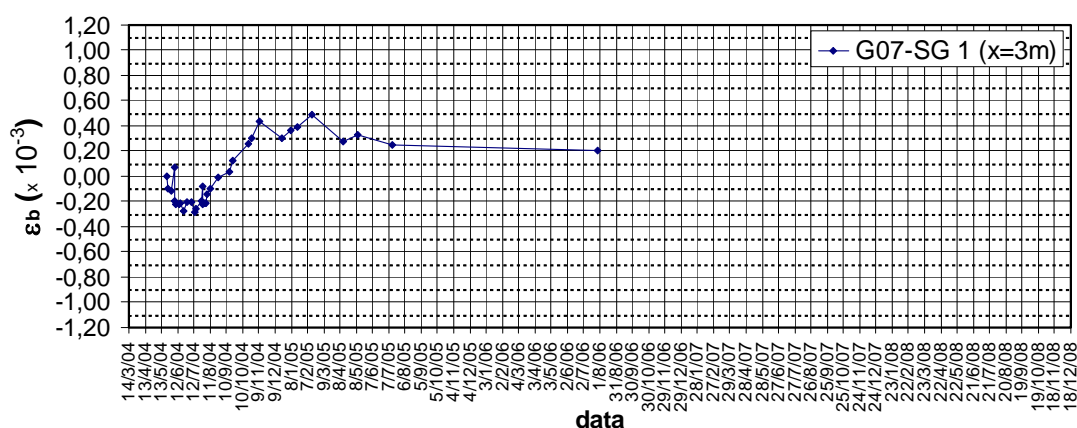
Figura 161. Avaliação da flexão no grampo C07 a 3m da face - SG1.

O comportamento dos grampos instrumentados C07 e G07 são apresentados no Apêndice 05 (Figuras A53 a A67). Resumidamente, os valores de momentos fletores obtidos no grampo C07 são inferiores a  $10\%M_{m\acute{a}x}$  para o primeiro trecho da barra (até 3m da face da escavação) e para o trecho final ( $x > 14m$ ). Nestes trechos os valores de

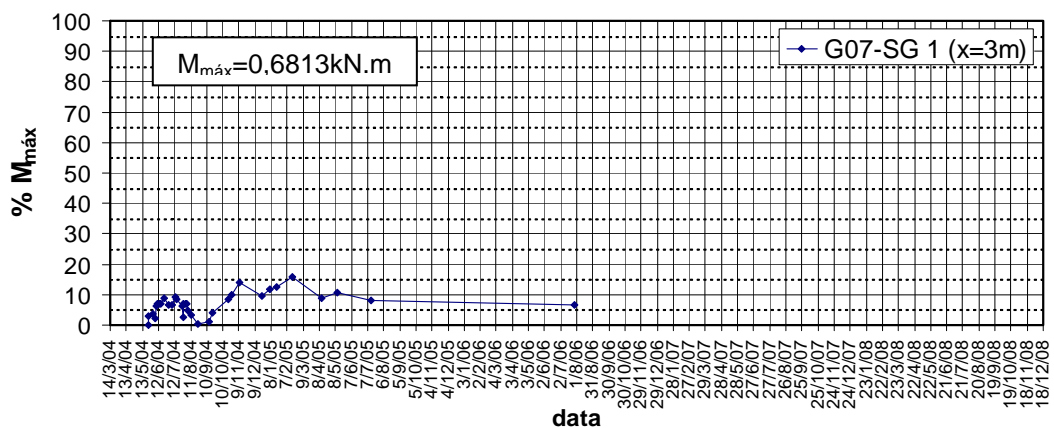


momentos fletores obtidos foram muito pequenos, próximos a zero. Os maiores valores foram observados no terço central da barra, a 11m da face da escavação, chegando a  $35\%M_{m\acute{a}x}$  em 27 de Outubro de 2004.

Os momentos calculados na barra G07 (face inferior) também são pequenos, porém mais elevados que na face superior. A mobilização média varia de 15% a  $35\%M_{m\acute{a}x}$ , sendo os maiores valores de  $M$  obtidos a 11m da face da escavação (SG4). O comportamento dos “strain-gauges” SG0 e SG2 foi insatisfatório, pois os mesmos apresentaram defeitos, sendo as leituras interrompidas durante o monitoramento.



(a) Deformações devido à flexão do grampo



(b) Mobilização de momento fletor

Figura 162. Avaliação da flexão no grampo G07 a 3m da face - SG1.

De uma maneira geral, os valores reduzidos das deformações resultantes da flexão da barra ( $\epsilon_b$ ) indicaram que o talude em solo grampeado apresenta um fator de segurança satisfatório. Para que haja mobilização considerável dos momentos fletores, as deformações na massa de solo grampeado devem ser elevadas, caracterizando uma possível condição de ruptura do talude ( $FS \approx 1,00$ ), com desenvolvimento de uma superfície ou zona de cisalhamento. Durante a construção e em serviço, os grampos

instrumentados indicaram pequenos valores de momentos fletores com reduzida mobilização de  $M_{m\acute{a}x}$ .

Em algumas datas de monitoramento, a mudança de sinal de  $\varepsilon_b$  indicou que os grampos instrumentados apresentaram variações no padrão de comportamento. Esta mudança pode estar associada aos seguintes fatores:

- Geologia local (heterogeneidade do solo): descontinuidades no maciço e regiões de interface de materiais mais rígidos com outros de menor rigidez podem acarretar variações no comportamento do grampo, quando da movimentação do maciço, durante a escavação;
- Alinhamento imperfeito dos segmentos da barra de aço durante a colocação no furo: Isto acarreta medições imprecisas de momentos fletores, visto a variação do plano de referência.
- Desalinhamento dos “strain-gauges” (superior e inferior) durante o processo de colagem que pode afetar o padrão de leituras, não sendo possível a medição correta de momentos fletores, conforme a flexão da barra.

Um estudo mais detalhado sobre o padrão de comportamento dos “strain-gauges” quanto à flexão deve ser realizado, porém não é do escopo desta pesquisa. Vale ressaltar que, até o momento não existe monitoramento de momentos fletores em escavações grampeadas no Brasil, com altura superior a 10m. Os resultados aqui apresentados podem contribuir no futuro para o maior entendimento do comportamento de flexão dos grampos em taludes em solo grampeado.

### **6.3.**

#### **Análises das deformações na escavação grampeada e das solicitações nos grampos**

O principal objetivo da instrumentação e monitoramento geotécnico empregado nesta pesquisa foi o de entender o comportamento de uma escavação grampeada, em solo residual de gnaíse. A análise dos resultados fornecidos pelos inclinômetros e “tell tales”, assim como, os esforços calculados nos grampos monitorados, auxiliarão no entendimento da técnica em solos tropicais. A interpretação destes dados será abordada nos itens seguintes.

### **6.3.1. Avaliação dos deslocamentos durante a escavação e após o grampeamento do solo**

Os resultados fornecidos pela inclinometria indicaram que os deslocamentos horizontais aumentam com o avanço da escavação e persistem após o término da obra (Figuras 151 a 156).

A movimentação do talude em solo grampeado pode ser acompanhada pelos deslocamentos horizontais máximos, obtidos a partir dos dados de I1(hipótese 02) e I2. As Figuras 163 e 164 ilustram os deslocamentos máximos fornecidos pelos inclinômetros na direção principal e secundária, conforme orientação indicada na Figura 133. São apresentados também os valores de  $\delta_h^{m\acute{a}x}$  (esp), que são estimativas dos deslocamentos horizontais máximos, resultantes da extrapolação das curvas apresentadas.

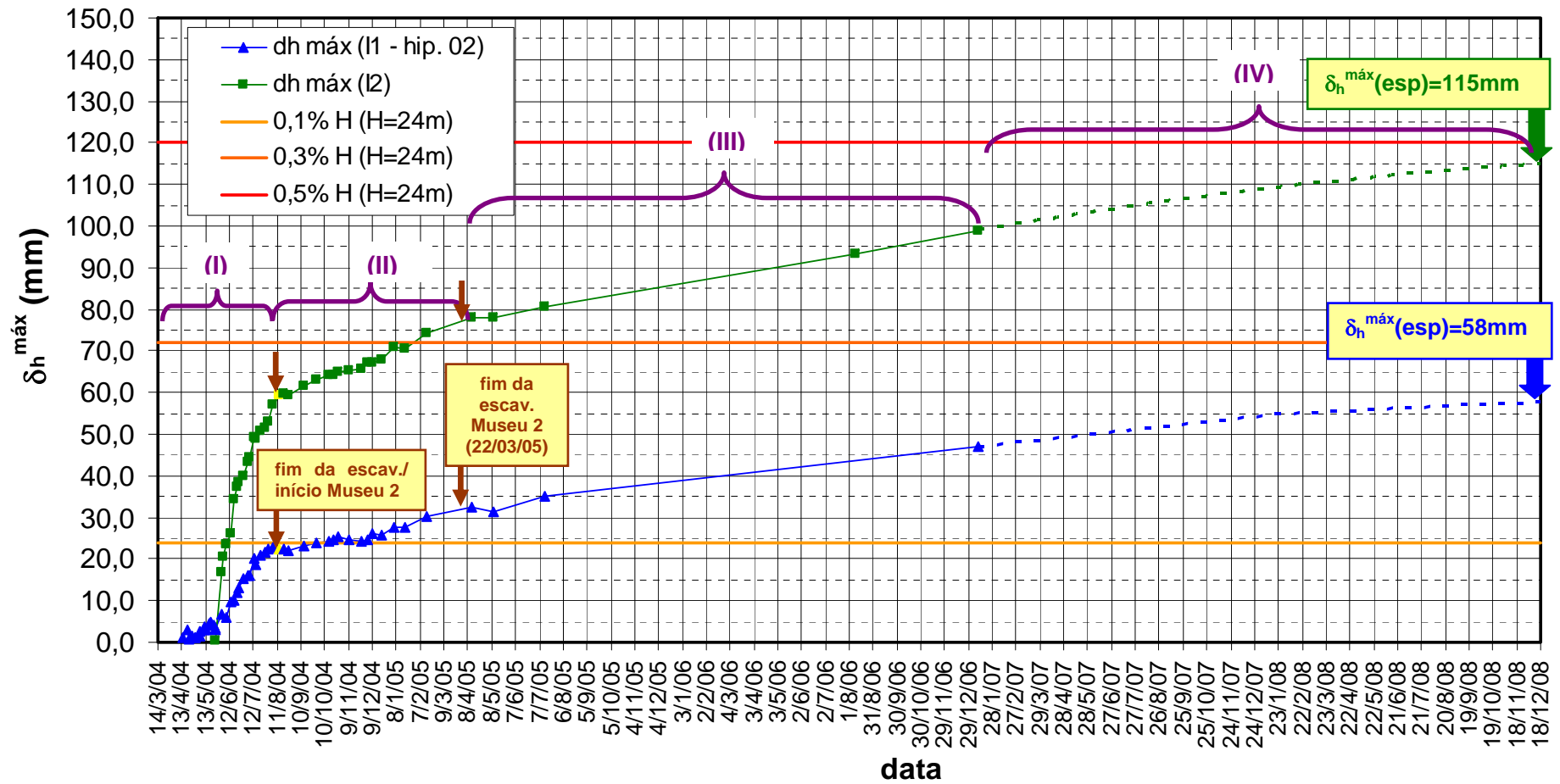


Figura 163. Deslocamento horizontal máximo fornecido pelos inclinômetros (direção principal).

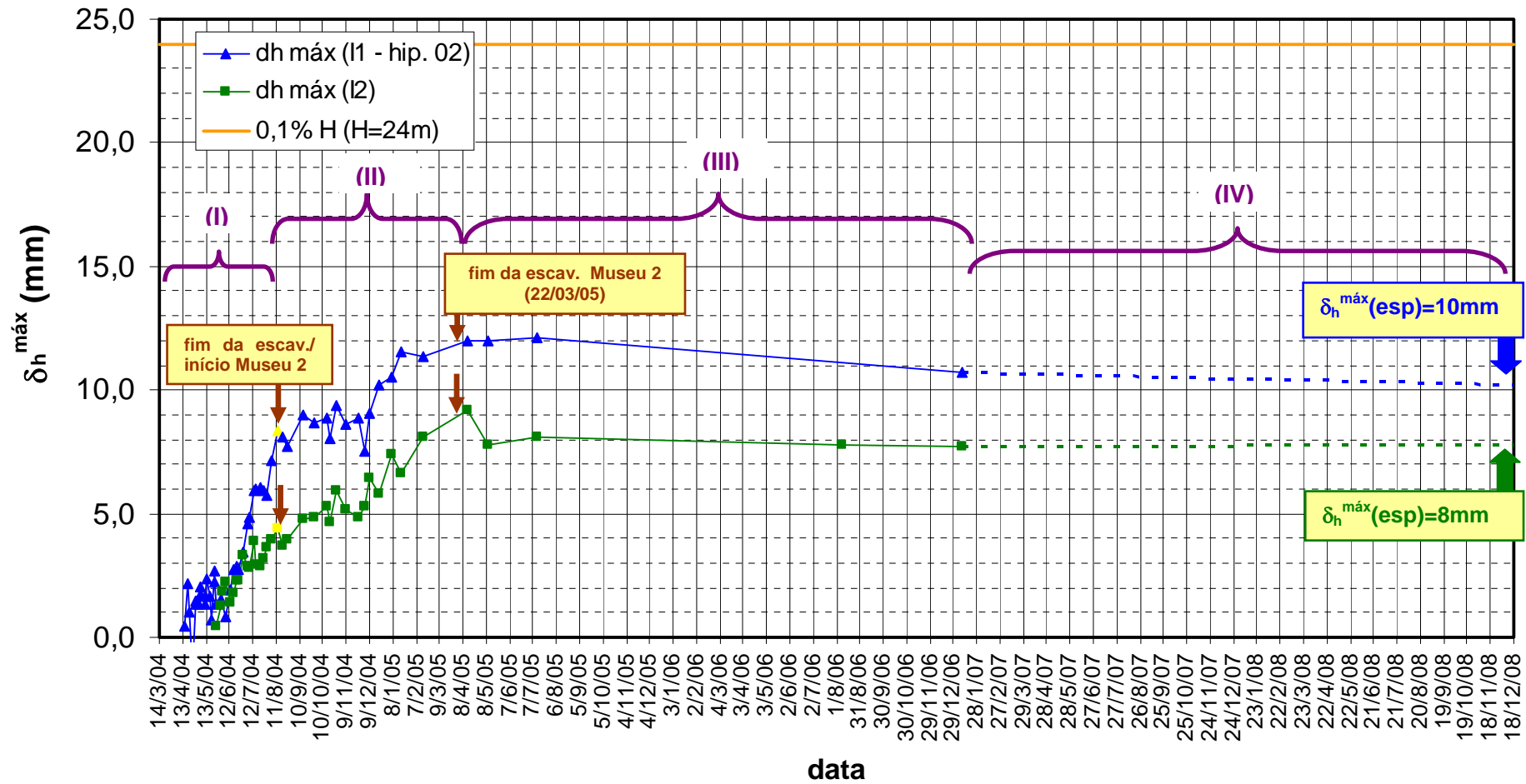


Figura 164. Deslocamento horizontal máximo fornecido pelos inclinômetros (direção secundária).

Conforme observado na Figura 163, o comportamento do maciço pode ser dividido em 4 fases. No trecho (I) das curvas  $\delta_h^{\text{máx}}$  vs. data de leitura, há um crescimento acelerado dos deslocamentos conforme o avanço da escavação. Neste trecho a taxa de deslocamento do maciço ( $t_d$ ) é a mais elevada, da ordem de 0,18mm/dia (I1) e de 0,79mm/dia (I2). Na execução de escavações em solo grampeado, os maiores deslocamentos observados no maciço ocorrem durante a construção, tendo em vista a descompressão progressiva do solo, em função das sucessivas fases de escavação. Este padrão de comportamento foi também observado em Schlosser (1982), Stocker e Riedinger (1990) e Shiu (1997).

Finalizado o grampeamento do solo em 12 de Agosto de 2004, observa-se ainda um aumento de deslocamentos (trecho (II)). Esta movimentação está associada ainda à acomodação da massa de solo e ao desconfinamento lateral provocado pela escavação vizinha (“Museu 2”), a qual iniciou-se em 13/08/04 e terminou em 22/03/05. A taxa de deslocamento neste trecho foi de 0,04mm/dia (I1) e 0,08mm/dia (I2), com redução média de 85% em relação ao trecho (I). O trecho (III) define o intervalo entre o término da escavação do “Museu 2” e a última leitura apresentada. Neste trecho, observa-se uma suave redução da taxa de deslocamentos associada, possivelmente, ao término da escavação vizinha e a mobilização dos esforços nos grampos, com valores de 0,03mm/dia (I1) e 0,04mm/dia (I2). Finalmente o trecho (IV) indica uma tendência à estabilização dos deslocamentos horizontais. O deslocamento horizontal máximo esperado é de 58mm para o inclinômetro I1 e de 115mm para o I2. O valor de  $t_d$  tende a zero, sendo aproximadamente igual a 0,02mm/dia, para ambos os instrumentos.

O padrão de movimentação na direção secundária é semelhante ao observado na direção principal (Figura 164), porém a ordem de grandeza dos deslocamentos é significativamente menor, como já comentado no item 6.2.1. Durante a fase da escavação, verifica-se uma maior movimentação, da ordem de 0,07mm/dia e de 0,04mm/dia, para I1 e I2 respectivamente. Os deslocamentos delimitados pelo trecho (II), também aumentam com o término da escavação (cerca de 0,01mm/dia). Observa-se uma nítida tendência de estabilização das leituras na direção secundária (trecho III), com o final da escavação do “Museu 2”, havendo coerência entre as leituras de ambos os inclinômetros. No trecho (IV), o deslocamento horizontal máximo esperado é maior para o inclinômetro I1 (10mm). O valor estimado para o I2 é de 8mm.

A magnitude de  $\delta_h^{\text{máx}}$  para diversas etapas do monitoramento é apresentada na Tabela 64. Finalizada a construção, os valores de  $\delta_h^{\text{máx}}$  são inferiores a 0,3%H no talude inferior. No talude superior, a menor movimentação

equivale a aproximadamente 0,1%H. No final da escavação da obra vizinha, observa-se um acréscimo de deslocamentos horizontais de 25%, sendo  $\delta_h^{\text{máx}}$  igual a 0,13%H e 0,32%H, para I1 e I2, respectivamente. Convém ressaltar que estas movimentações ocorrem nas cotas +43,0 e +36,5.

Tabela 64. Deslocamentos horizontais máximos calculados com os inclinômetros

Data de leitura	Inclinômetro I1		Inclinômetro I2	
	$\delta_h^{\text{máx}}$ (mm)	$\delta_h^{\text{máx}}$ (%H)	$\delta_h^{\text{máx}}$ (mm)	$\delta_h^{\text{máx}}$ (%H)
Fim da escavação do "Museu 1" / início da escavação do "Museu 2" (leitura de 13/08/04)	22,4	0,09	59,3	0,25
Fim da escavação do "Museu 2" (leitura de 13/04/05)	32,3	0,13	77,9	0,32
Última medição (10/01/07)	46,9	0,20	99,0	0,41
Medida estimada em 18/12/08 (extrapolação)	58,0	0,24	115,0	0,48

Onde H=24,0m; altura do talude em solo grampeado.

Na última medição realizada, os deslocamentos obtidos nas cotas supracitadas foram de 0,20%H e 0,41%H. Isto significa um aumento de 52% e 40%, para os dois inclinômetros da obra, depois de 2 anos e 10 meses de monitoramento.

Na data prevista de 18/12/08, quando é nítida a estabilização dos deslocamentos, estima-se uma movimentação na direção principal de 0,24%H (no talude superior) e de 0,48%H (no talude inferior). Para os inclinômetros I1 e I2, estes valores indicam um aumento de 158% (I1) e 98% (I2) dos deslocamentos, cerca de 4 anos e 5 meses após o término da escavação. Lazarte et al. (2003) sugeriram um aumento de 15% nos deslocamentos em solo grampeado, em até 6 meses do término da obra, associados a alívio de tensões e efeito de creep. Wong et al. (1997) indicaram aumento de 30% após 3 anos de monitoramento de uma escavação instrumentada em solo residual (H=9,0m).

Vale ressaltar que as previsões de 18/12/08 devem ser confirmadas com a continuidade da instrumentação geotécnica e monitoramento da obra. Em

outra escavação grampeada ( $H=14,5\text{m}$ ), Stocker e Riedinger (1990) reportaram que os deslocamentos horizontais cessaram após 3 anos de monitoramento da obra. Segundo os autores, o processo de estabilização da massa de solo grampeado foi influenciado por uma construção próxima a crista do talude. Em contrapartida, Durgunoglu et al. (2003) indicaram aumento dos deslocamentos horizontais somente até 40 dias após o fim de uma escavação de  $21,7\text{m}$  de altura. Como observado, não existe um padrão definido para o equilíbrio da massa grampeada, sendo este função, principalmente, do tipo de solo e condições de carregamento.

Os deslocamentos calculados e estimados estão de acordo com a faixa de valores apresentados na literatura, a partir de resultados de monitoramento com inclinômetros e marcos superficiais. Usualmente, os valores de  $\delta_h^{\text{máx}}$  variam entre  $0,1\%H$  a  $0,5\%H$ , para escavações verticais em solos homogêneos. Esta faixa de valores é verificada também em solos residuais (SR), conforme ilustra a Figura 165. Nesta figura, encontram-se resultados das leituras dos inclinômetros instalados no maciço. Observa-se que os valores obtidos e estimados situam-se na faixa de valores proposta, sendo inferiores a  $0,5\%H$ .

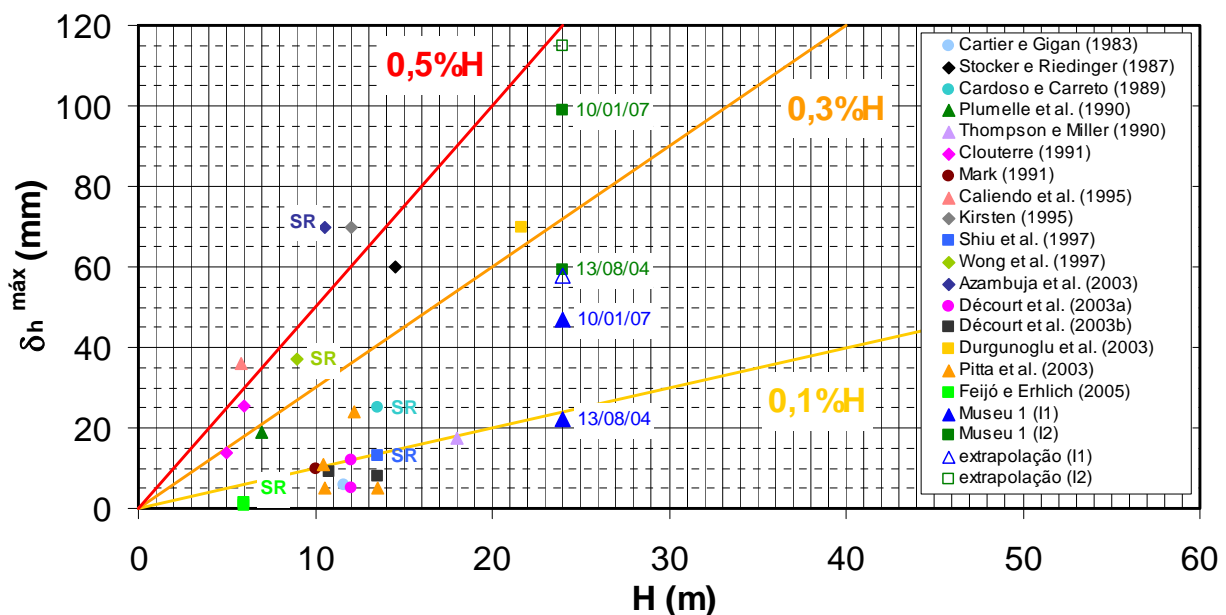


Figura 165. Deslocamento horizontal máximo observado em taludes grampeados.

A partir dos valores de  $\delta_h^{\text{máx}}$  e dos dados de projeto das obras reportadas na Figura 165, observa-se que os deslocamentos horizontais máximos para



escavações grampeadas em solos residuais situam-se dentro do limite proposto pela equação (32).

$$0,1\%H \leq \delta_h^{\text{máx}} \leq 0,5\%H \quad (\text{para } 0,5 \leq L/H \leq 1,0) \quad \text{eq. (32)}$$

A evolução da movimentação horizontal máxima (normalizada pela altura da escavação em solo grampeado), durante os sucessivos estágios de execução do reforço do maciço, é apresentada na Figura 166. Os deslocamentos horizontais são menores no início da escavação e aumentam com o avanço da obra de forma não linear. Em solos homogêneos com estágios de escavação bem controlados e comprimento de grampo constante, a relação  $(\delta_h^{\text{máx}} / H_{\text{escav}})$  vs.  $H_{\text{escav}}$  é linear (Clouterre, 1991).

O processo de movimentação do talude é mais acelerado na face subvertical (talude inferior-face G), onde a relação de L/H varia de 0,63 a 0,75 (na face superior tem-se  $0,88 \leq L/H \leq 1,0$ ). A geometria do talude em solo grampeado, associada ao processo executivo, densidade e orientação dos grampos, relação L/H e a geologia do local são responsáveis pela diferença de comportamento de I1 e I2 (Figura 166).

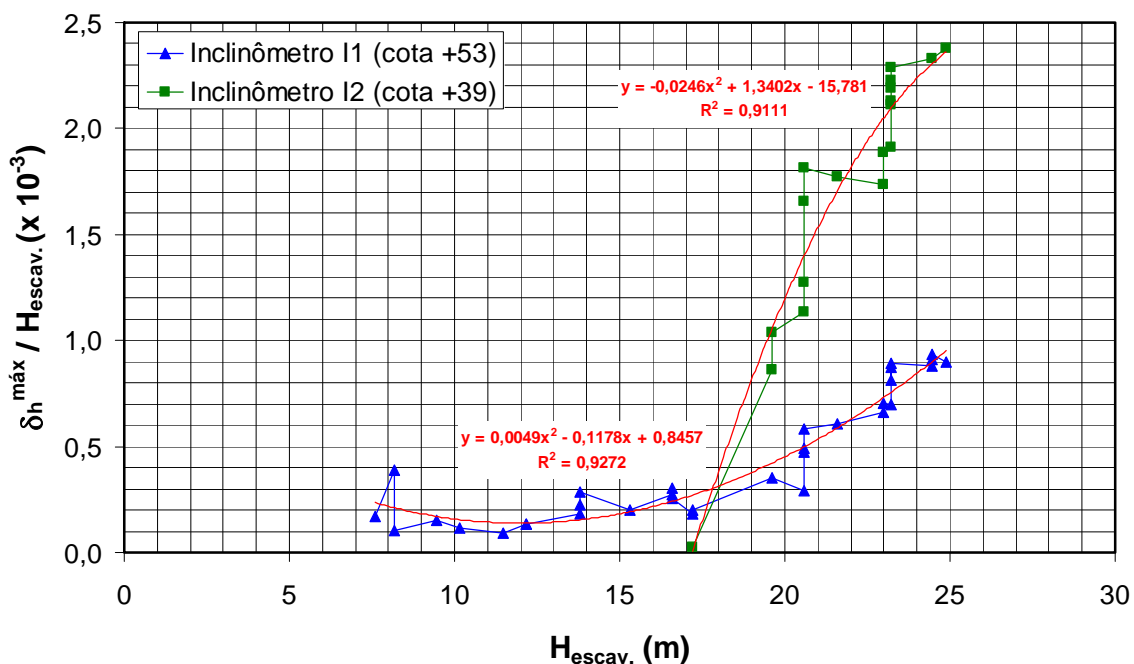


Figura 166. A evolução da movimentação horizontal máxima, durante os sucessivos estágios de escavação.

A evolução de  $\delta_h^{\text{máx}}$  pode ser estimada durante o processo de escavação. As equações (33) e (34) apresentam os deslocamentos normalizados para cada estágio da escavação em solo residual de gnaíse.

Para  $\beta=60^\circ$ , têm-se:

$$(\delta_h^{\text{máx}} / H_{\text{escav}}) \times 10^{-3} = 0,0049 \cdot H_{\text{escav}}^2 - 0,1178 \cdot H_{\text{escav}} + 0,8457 \quad \text{eq. (33)}$$

Para  $\beta=85^\circ$ , têm-se:

$$(\delta_h^{\text{máx}} / H_{\text{escav}}) \times 10^{-3} = -0,0246 \cdot H_{\text{escav}}^2 + 1,3402 \cdot H_{\text{escav}} - 15,781 \quad \text{eq. (34)}$$

Uma forma mais simples de se prever os deslocamentos horizontais máximos no talude pesquisado é ilustrada na Figura 167. As curvas apresentadas indicam os deslocamentos máximos na direção principal da movimentação do maciço, durante todo o monitoramento da obra. Os resultados são referentes à instrumentação das faces C e G.

O gráfico apresentado na Figura 167 ilustra uma forma bem interessante de se avaliar a magnitude de  $\delta_h^{\text{máx}}$  durante o processo de grampeamento do solo. Os resultados indicam que os deslocamentos da massa de solo grampeado aumentam exponencialmente com o avanço da obra. Os valores de  $\delta_h^{\text{máx}}$  aumentam quando a altura da escavação equivale a 72% da altura total do talude.

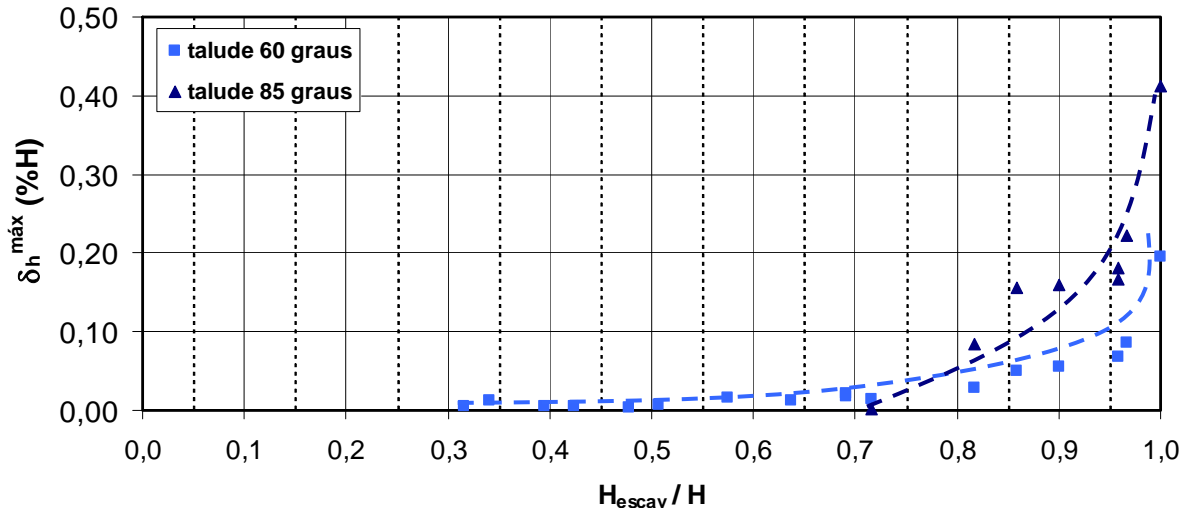


Figura 167. Estimativa da movimentação horizontal máxima do talude grampeado.

A movimentação do talude em solo grampeado, durante todo o monitoramento também pôde ser acompanhada pelos deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” (Figuras A28 a A33, Apêndice 03).

A consistência dos deslocamentos dos “tell tales” pode ser verificada se forem comparados os registros das 6 caixas com aqueles obtidos pelos

inclinômetros. A Tabela 65 apresenta as medições de deslocamentos fornecidos por ambos os equipamentos, para 3 estágios de monitoramento. As localizações dos deslocamentos máximos, fornecidos pelos inclinômetros definem os “tell tales” a serem considerados nas análises. O valor de  $\delta_h^{\text{máx}}$  para o inclinômetro I1 situa-se a cerca de 10,0m de profundidade do tubo. Neste ponto, foi considerado o deslocamento fornecido pelo “tell tale” de 7m da caixa 3. A maior movimentação do tubo do I2 ocorreu à cerca de 2,5m de profundidade, sendo considerado os resultados do “tell tale” de 1,5m da caixa 5 (Figura 132).

Tabela 65. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” e inclinômetros

Instrumentos	Fim da escavação do “Museu 1” / início da escavação- “Museu 2” (leitura de 13/08/04)	Fim da escavação do “Museu 2” (leitura de 13/04/05)	Última medição (TTs-09/11/06) (I1 e I2-10/01/07)
Cx. 03 (TT2)	1,0mm	1,0mm	3,0mm
I1 (hip.2)	22,4mm	32,3mm	46,9mm
Cx. 05 (TT1)	0,5mm	0,5mm	1,0mm
I2	59,3mm	77,9mm	99,0mm

Os resultados apresentados na Tabela 65 mostram uma diferença significativa entre os valores de deslocamentos fornecidos pelos inclinômetros e “tell tales”. No caso da face C, os deslocamentos do “tell tale” TT2 da caixa 3 equivalem a aproximadamente 5% dos resultados da inclinometria. Para a face G, observa-se uma diferença maior, sendo os deslocamentos do TT1 equivalentes a 1% dos valores de I2.

A diferença encontrada pode ser explicada pela incompatibilidade dos sistemas de medição. Os “tell tales” medem deslocamentos em um ponto. Os inclinômetros medem deslocamentos ao longo da profundidade e com uma precisão maior que os “tell tales”. Além disso, os deslocamentos medidos pelos “tell tales” são questionáveis, pois as caixas de leitura estão fixadas na face do talude, que se movimenta juntamente com todo o maciço grampeado. Assim, os valores de  $\delta$  dos “tell tales” são resultados de deslocamentos de pontos específicos do maciço em relação às caixas de leituras (ou face do talude). Para se obter os deslocamentos absolutos seria necessário um monitoramento das

movimentações das caixas, por leituras topográficas. Este controle não foi utilizado na pesquisa.

Os resultados de todas as caixas estão ilustrados na Figura 168 que apresenta os dados do final da escavação da obra (13/08/04), do final da escavação vizinha (13/04/05) e da última leitura realizada (09/11/06).

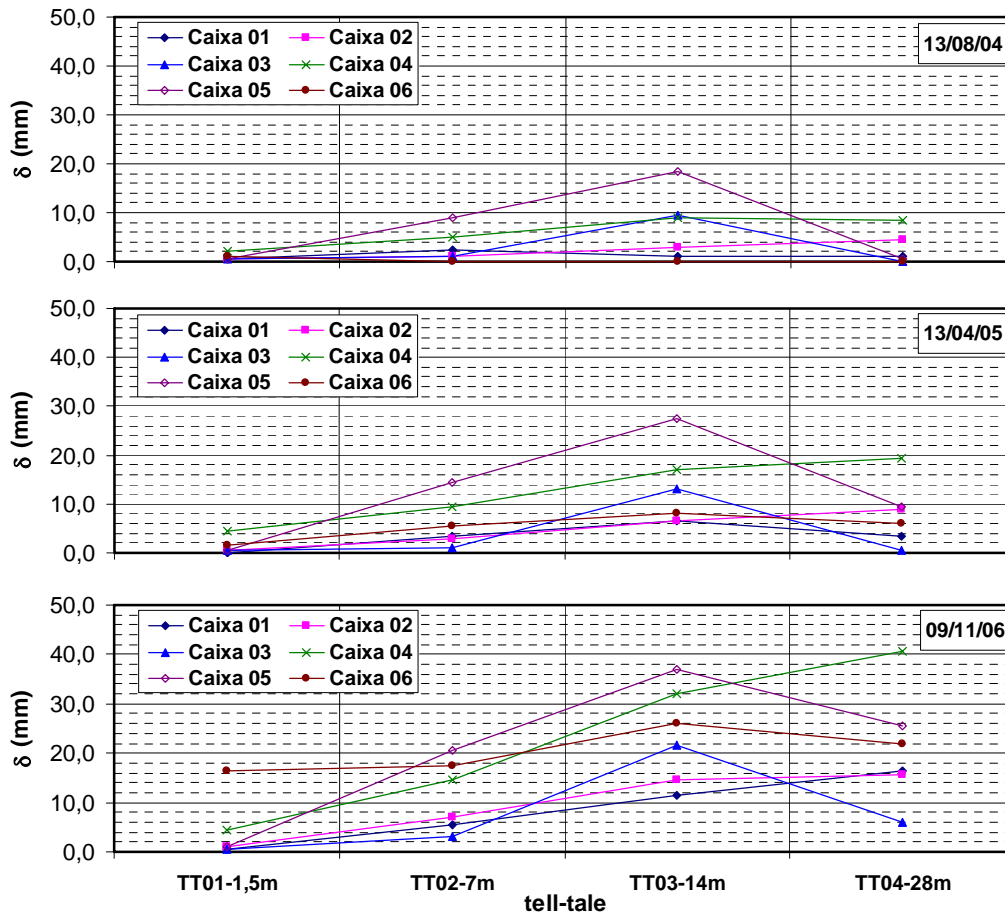


Figura 168. Deslocamento dos “tell tales” em 3 fases do monitoramento.

Os valores de deslocamentos apresentados na Figura 168 indicam um crescimento dos deslocamentos com o avanço das escavações e do monitoramento da obra. Após o término da escavação do “Museu 2” (13/04/05), observa-se ainda um aumento nos valores de  $\delta$ , principalmente nas caixas instaladas na face G (inferior).

Apesar das limitações referentes ao tipo de leituras fornecidas pelos “tell tales”, é possível monitorar, com estes instrumentos, a movimentação do maciço durante toda a fase construtiva. A interpretação dos resultados dos “tell tales” contribui para a segurança da obra. Durante o processo de escavação, é possível verificar a ocorrência de um aumento significativo nos valores de  $\delta$ . A partir daí, pode-se adotar medidas preventivas, tais como, aumento da

densidade de grampos, escavações em nichos, redução da altura de escavação, etc., para minimizar a variação dos deslocamentos com o avanço da obra. Vale ressaltar que estas afirmações também são válidas para os resultados da inclinometria, lembrando que a instalação dos “tell tales” é mais simples e o custo do equipamento é bem inferior ao do inclinômetro.

Analisando-se a variação de leituras de todos os “tell tales” (Figura 168), constatou-se que os maiores deslocamentos, em geral, foram aqueles fornecidos pelos dois cabos mais longos, cujos comprimentos são 14 e 28m (“tell tale” 03 e 04). No caso das caixas 2 e 6 os valores obtidos são muito próximos. Os “tell tales” de 1,5m de comprimento apresentaram valores baixos de deslocamentos, sem variações significativas durante o monitoramento, confirmando a hipótese de movimentação da face da escavação, mencionada anteriormente. A interpretação desses resultados possibilita delimitar uma região de maior movimentação do maciço (Figura 169). A superfície potencial de ruptura global, definida pelas análises em equilíbrio limite, está inserida nesta região, confirmando a aplicabilidade deste instrumento para entender o comportamento da massa de solo grampeado, possibilitando a detecção de zonas de maiores movimentações e eventuais planos de ruptura no talude. Esta é uma grande vantagem destes medidores mecânicos.

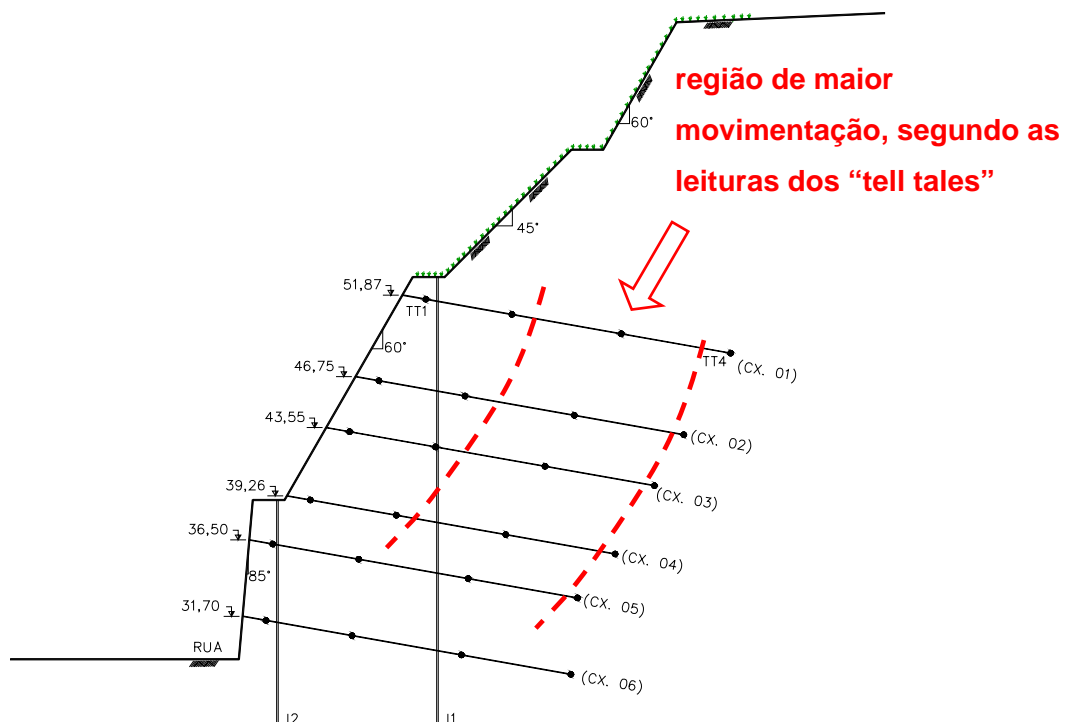


Figura 169. Região de maiores deslocamentos fornecidos pelos “tell tales”.

### **6.3.2. Avaliação das solicitações nos grampos durante a construção e em serviço**

As deformações no maciço de solo grampeado (em particular, extensão lateral) induzem à mobilização de tensões cisalhantes ao longo do contato solo-grampo que acarretam em tensões de tração nos reforços.

Os esforços axiais nos grampos foram monitorados durante toda a execução da escavação em solo grampeado e após o término da obra.

Os resultados da instrumentação com os extensômetros elétricos são apresentados nas Figuras 170 e 171. Os gráficos correspondem à carga axial mobilizada em cada ponto da barra, durante todo o monitoramento. São fornecidos os valores de  $F_{axial}$  dos grampos C07 e G07, da 1ª linha das faces C e G, respectivamente.

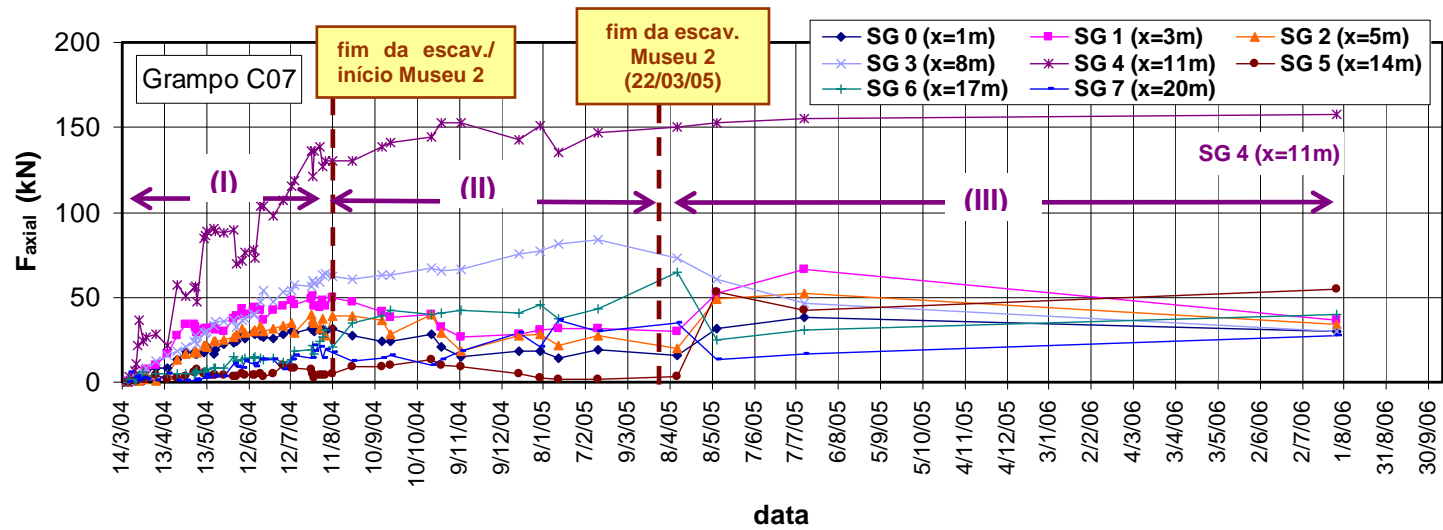


Figura 170. Força axial, ao longo do grampo C07 durante todo o monitoramento.

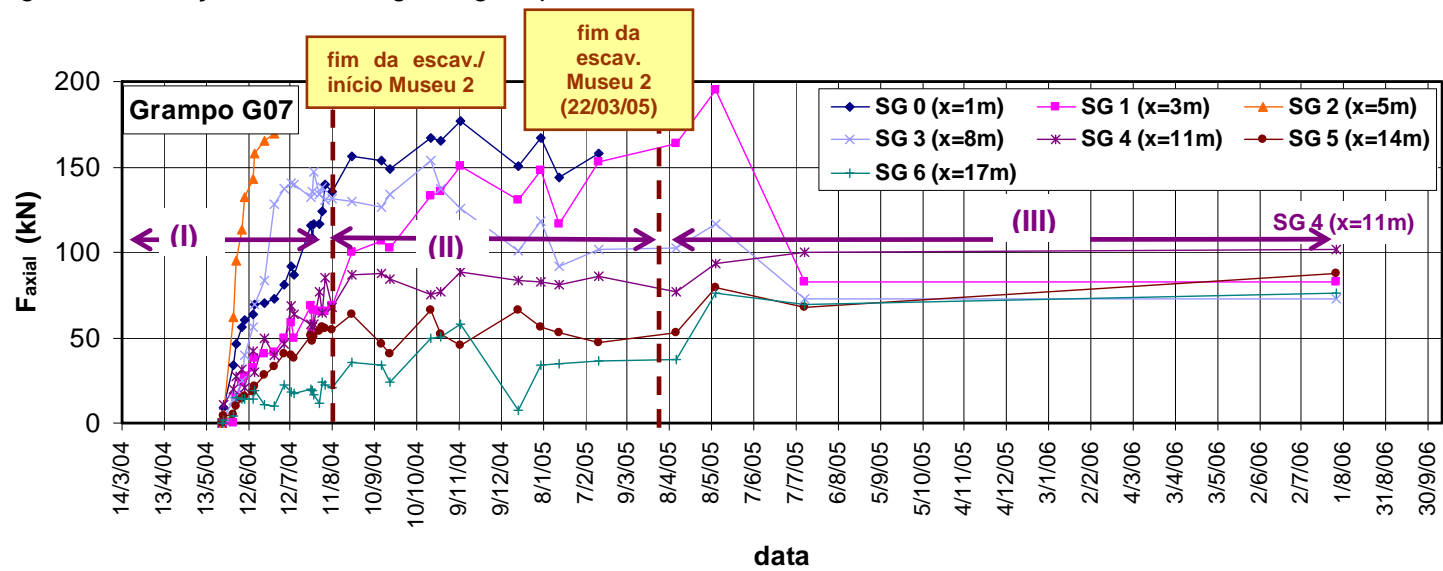


Figura 171. Força axial ao longo do grampo G07 durante todo o monitoramento.

As Figuras 170 e 171 mostram que os “strain-gauges” instalados nas barras apresentaram desempenhos satisfatórios, indicando claramente a variação da magnitude da  $F_{axial}$  durante todo o monitoramento. Durante as sucessivas fases de escavação, onde o maciço grampeado é submetido à descompressão lateral, observou-se um aumento das forças axiais nos grampos. Este aumento não obedece a uma variação linear pois o processo de escavação e injeção dos grampos não foi feito de forma seqüencial como ilustram as Figuras 93, 94, 98 e 99.

Durante a escavação da face C (Figura 170), a mobilização das tensões cisalhantes em quase todo o grampo C07 foi pequena (inferior a 65kN). Apenas em um ponto da barra, a 11m da face do talude (SG4), apresentou comportamento distinto, indicando que os maiores esforços axiais encontram-se nesta região. A tração na barra, naquele local, foi de 130kN ao final da escavação (12/08/04).

A influência do avanço da escavação é mais significativa na face inferior (Figura 171). O acompanhamento das leituras dos extensômetros do grampo G07, indicou que os valores de tração durante a escavação da obra do “Museu 1” são maiores que no grampo superior. Ao final da escavação, a  $F_{axial}$  é superior a 50kN até 14m da face. A tração máxima é de 135kN a 1m da face do talude. Este padrão de comportamento também foi observado na interpretação dos demais resultados da extensometria (Apêndice 04). Os grampos mais solicitados foram aqueles posicionados na face inferior do talude grampeado. Vale ressaltar que, nesta região, registraram-se os maiores deslocamentos horizontais (inclinômetro I2).

A magnitude de  $F_{axial}$  aumenta progressivamente com o avanço da obra, sendo a variação das solicitações função do processo executivo, inclinação da face, densidade dos grampos, geologia e escavações vizinhas. Estes fatores têm grande parcela de contribuição na resposta dos “strain-gauges”.

O padrão de comportamento dos grampos instrumentados pode ser dividido em 3 fases distintas (Figuras 170 e 171). Na fase (I), durante a escavação em solo grampeado (até 11/08/2004), a mobilização dos grampos está associada à descompressão lateral do solo, devido ao processo executivo. Nesta fase, o acréscimo de  $F_{axial}$  durante o período de monitoramento é maior que nas fases subseqüentes, onde não há mais movimentação de material na face do talude. Durante o período de construção (fase I) são observados os maiores incrementos de solicitações nos reforços.



Após o término da escavação e início da execução da contenção vizinha (fase II - 12/08/2004), verifica-se uma tendência de estabilização das cargas do grampo da face superior (Figura 170). Nesta região já se observa uma menor variação das leituras com o tempo, sendo as maiores solicitações obtidas a 11m da face. O monitoramento do grampo G07 indica que os reforços na face inferior apresentam um comportamento distinto. As variações da força de tração no grampo são oriundas da acomodação do maciço grampeado e da influência da escavação vizinha, já que esta região é significativamente afetada pela obra do “Museu 2”. Nesta fase, a região do grampo G07 mais mobilizada está localizada a 1m da face do talude.

Com o término da escavação em 22/03/2005 (Fase III), as Figuras 170 e 171 indicam uma nítida tendência de estabilização dos esforços axiais nos grampos. A influência do desconfinamento lateral do maciço não é mais significativa. A redução da movimentação e a acomodação da massa de solo grampeado acarretam em uma diminuição da mobilização dos reforços.

A mobilização dos esforços axiais para as 3 fases do monitoramento é apresentada na Figura 172. Os resultados de  $F_{axial}$  confirmam que a mobilização de todos os grampos instrumentados aumenta progressivamente com o avanço da escavação e não cessam com o término da obra. Observando-se a magnitude da força axial nas barras instrumentadas, reporta-se que os grampos mais solicitados na data de 27/07/06 (última leitura) são C37 (3ª linha - face C) e G54 (4ª linha - face G). Nestes reforços, as trações máximas são de 170,1kN (a 8m da face) e 217,5kN (a 5m da face), respectivamente. Correspondem a um acréscimo de carga de 158% (C37) e 110% (G54) em relação às medições realizadas no término da obra (11/08/04). Estes dados representam um alerta para a segurança das obras em solo grampeado. Isto porque, em algumas situações, o projetista não leva em consideração este acréscimo de carga nos reforços (a maioria dos projetos é elaborada com base em programas computacionais baseados na teoria do equilíbrio limite, cujos resultados representam o final da obra). Vale ressaltar que os valores de tração encontrados equivalem a 69% e 88% da tensão de escoamento da barra de aço ( $T_{escoamento}=247,8kN$ ). Uma discussão sobre a distribuição de tensões nos grampos e a localização do ponto de tração máxima será apresentada a seguir.

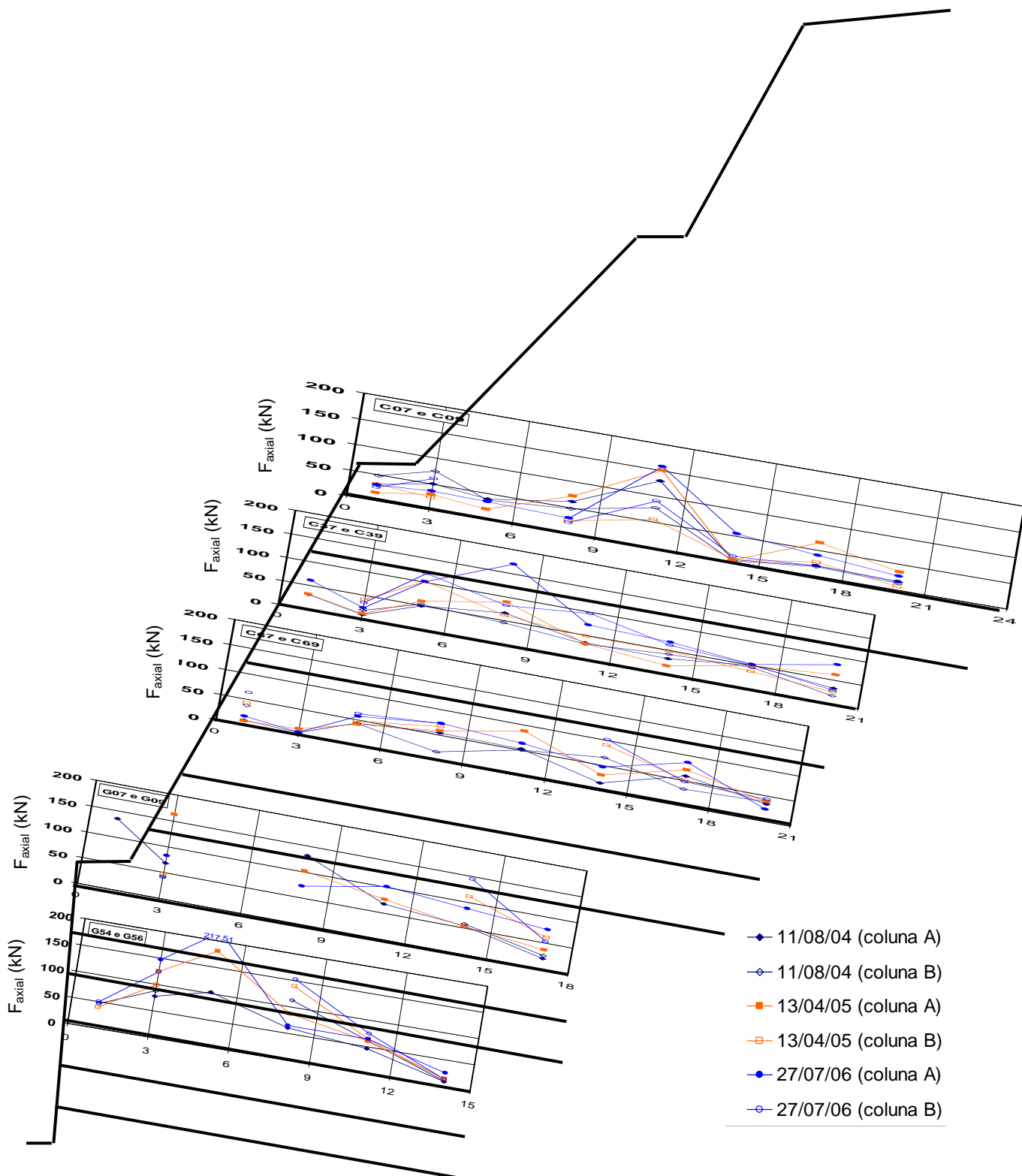


Figura 172. Distribuição das forças axiais nos grampos instrumentados em 3 fases do monitoramento.

Na Figura 172, observa-se também que, em alguns trechos dos reforços, a força de tração não é igual nas colunas instrumentadas A e B. Esta diferença está associada possivelmente a uma combinação de dois fatores:

- Diferenças nas características geológico-geotécnicas dos perfis longitudinais das colunas A e B (nas faces C e G): em alguns trechos dos reforços das colunas instrumentadas, há variação do tipo de material do maciço (Figuras 105 e 107);
- Seqüência executiva: o processo de grampeamento do solo não foi uniforme no tempo. As etapas de escavação e injeção dos grampos variaram durante a obra (Figuras 93, 94, 98 e 99).

### 6.3.3.

#### **Distribuição das tensões nos grampos e ponto de tração máxima**

A interação solo-grampo que ocorre no interior da massa de solo grampeado é complexa. As solicitações que ocorrem nos grampos são, predominantemente, forças de tração resultantes da descompressão lateral do maciço grampeado, durante as sucessivas fases de escavação.

A distribuição de tensões nos grampos ao final da construção e, em serviço, é bastante similar àquela verificada em outras técnicas de reforço, tais como Terra-Armada. Os resultados de instrumentação de grampos e de análises numéricas indicam que a força de tração máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) varia em função da forma de fixação do grampo e em função das possíveis descontinuidades litológicas ao longo do grampo. Para o caso de grampos tipo “livre” (Figura 7e), em solos homogêneos, a maior solicitação ocorre dentro da massa grampeada e não na face da parede. Para grampos fixados com porca e placas metálicas (Figura 7a, 7b e 7c), o ponto de tração máxima ocorre junto à face da escavação.

A localização do ponto ou região onde a tensão de tração é máxima não é de fácil determinação, conforme já discutido anteriormente. A possibilidade de instrumentação dos grampos e monitoramento dos seus comportamentos durante toda a obra permitiu delimitar uma possível região onde há maior solicitação nos reforços. A Figura 173 apresenta os resultados da instrumentação referentes ao final da construção (11/08/04) com a definição desta região.

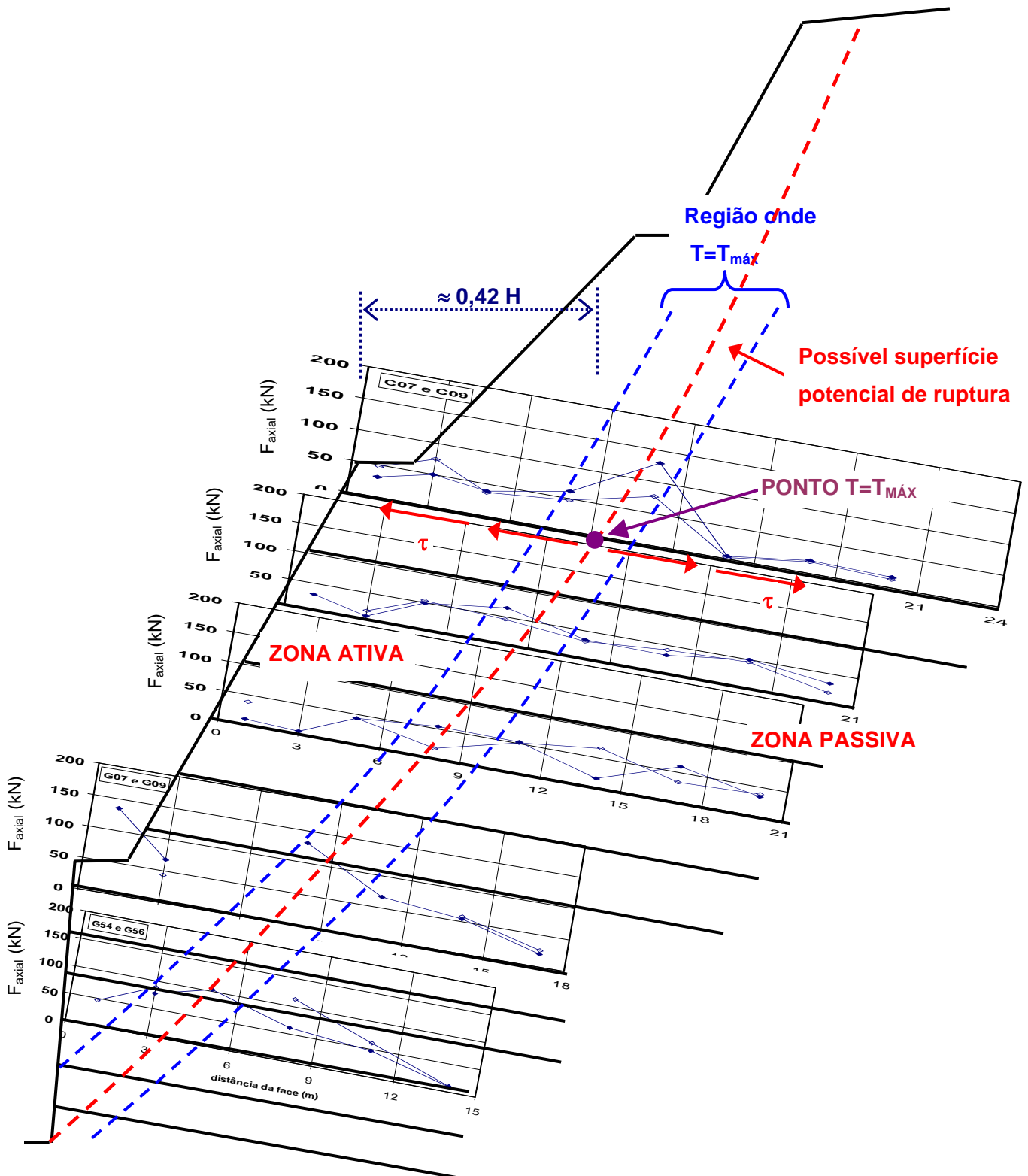


Figura 173. Determinação da região de máximos esforços ( $T=T_{\text{máx}}$ ) ao final da construção.

Conforme ilustrada na Figura 173, a região onde  $T=T_{\text{máx}}$  situa-se a uma certa distância da face da escavação. Nesta região, é possível traçar uma superfície potencial de ruptura global do talude (Krahn, 2001a e 2001b). Esta curva divide a massa de solo em 2 regiões distintas, confirmando a hipótese do mecanismo de ruptura com regiões ativa e passiva (Clouterre, 1991; Cardoso e Gonçalves, 1997; Springer, 2001; Lima et al., 2003a). Os grampos instrumentados comportam-se como “livres” em relação à face da escavação. A zona considerada ativa está situada atrás da face (as tensões de cisalhamento lateral são direcionadas para fora). Na zona passiva, mais interna, as tensões de cisalhamento lateral são direcionadas para dentro da massa de solo, em direção oposta aos deslocamentos laterais da zona ativa.

As distâncias entre os pontos onde  $T=T_{\text{máx}}$  e a face da escavação (Figura 173) variam com a profundidade e com a inclinação do talude. No topo do talude em solo grampeado, este parâmetro equivale a uma distância aproximada de 10m (ou  $0,42H$ ; sendo  $H=24\text{m}$  a altura do talude em solo grampeado). Em observações de campo, em taludes verticais, os valores encontrados por Mitchell (1987) e Clouterre (1991) situam-se entre  $0,30H$  a  $0,40H$  (e  $0,15H$  a  $0,20H$ , na parte inferior do talude). Em contrapartida, Schlosser e Unterreiner (1990) observaram que esta distância é da ordem de  $3,5H$ . Como observado não existe um valor esperado para esta distância já que nos casos estudados há variações no tipo de solo e no comprimento dos grampos do talude

A superfície potencial de ruptura ilustrada na Figura 173 apresenta uma forma circular, compatível com aquelas definidas nas hipóteses das análises em equilíbrio limite e comumente utilizadas nos projetos de solo grampeado. A premissa de que a superfície potencial seja circular invalida os métodos de análise que consideram uma superfície do tipo planar ou bi-linear (por exemplo, o Método Alemão). A consideração de um maciço estratificado também limita o emprego dos Métodos de Davis e Davis Modificado, de Cardiff e de Escoamento (Tabela 22).

É interessante notar que, a localização da superfície crítica, encontra-se no interior da região de maiores deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” (Figura 168). Portanto, há compatibilidade entre as medidas realizadas com os “tell tales” e os resultados da instrumentação dos grampos, confirmando a aplicabilidade deste tipo de transdutor.

A Figura 173 também indica que a contribuição de cada grampo, na estabilidade global do maciço, varia conforme a posição e comprimento do

reforço. Em geral, a contribuição na estabilidade depende da posição e orientação do grampo em relação à superfície crítica. A localização desta curva permite definir o comprimento dos grampos na região passiva ( $L_p$ ). Observando-se os resultados da instrumentação no final da construção (Figura 173), nota-se que a maior parcela de contribuição ao equilíbrio da massa é fornecida pelos grampos superiores (1ª linha - face C). Estes resultados diferem daqueles apresentados pelas análises de estabilidade, para o caso do talude saturado (Figura 148).

Na face C, o comprimento da 1ª linha de reforços no trecho passivo é da ordem de 15m. Em contrapartida, verifica-se que os grampos inferiores dispõem de um menor comprimento no trecho passivo. A 1ª linha da face G, por exemplo, tem um valor de  $L_p \approx 10m$ .

Uma comparação entre a forma das superfícies potenciais de ruptura é apresentada na Figura 174, onde a região onde  $T=T_{máx}$  está inserida nos resultados das análises de equilíbrio limite.

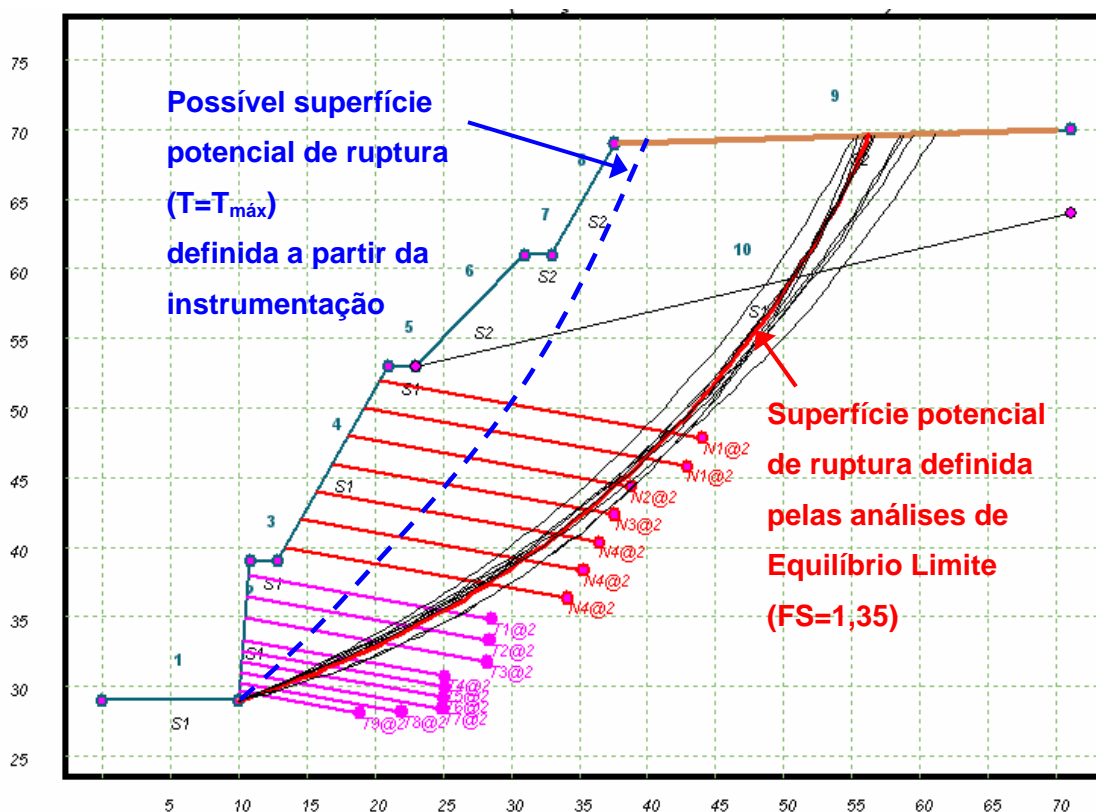


Figura 174. Comparação das superfícies potenciais de ruptura (Instrumentação x Equilíbrio Limite).

Em teoria, a superfície potencial de ruptura indicada pelas análises em equilíbrio limite, deveria coincidir com a superfície delimitada pelos pontos de

tração máxima (em “azul” na Figura 174). Entretanto, isto não ocorreu devido provavelmente à dificuldade, na ocasião, de se reproduzir as características geológico-geotécnicas do maciço e a seqüência executiva nas análises.

A superfície de cisalhamento que melhor representa o comportamento global da massa de solo grampeado é aquela definida a partir da interpretação da instrumentação dos grampos. É interessante citar que análises complementares em equilíbrio limite, empregando superfícies circulares semelhantes à apresentada pela instrumentação, forneceram FS crítico superiores a 1,56.

#### **6.3.4.**

#### **Magnitude das forças de tração máxima nos grampos**

O monitoramento dos esforços axiais, desenvolvidos em cada grampo, permitiu a obtenção das forças de tração máxima durante toda a construção e após a conclusão da escavação grampeada. Os valores da tração máxima em cada grampo instrumentado são apresentados nas Figuras 175. Os gráficos mostram os valores de  $F_{m\acute{a}x}$  desenvolvidos nos grampos das faces C ( $\beta=60^\circ$ ) e G ( $\beta=85^\circ$ ).

Conforme comentado no item 6.3.2. e ilustrado na Figura 175, o desenvolvimento das forças de tração aumentam com o avanço das escavações e indicam uma tendência à estabilização dos valores a partir de Julho de 2005.

Na face C, o valor de pico de  $F_{m\acute{a}x}$  é de 207,6kN e corresponde ao grampo C69 (20/12/2004). Entretanto, em quase todo o monitoramento, a maior mobilização de esforços axiais, ocorreu no grampo C07 (1ª linha). Na face subvertical, as maiores solicitações ocorreram nos grampos da coluna A (G07 e G54). O valor de pico foi encontrado na data de 07/07/04 ( $F_{m\acute{a}x}=207,0\text{kN}$ ) no grampo G07 (1ª linha). No final do monitoramento, os grampos mais solicitados nas faces C e G, foram respectivamente, C37 e G54.

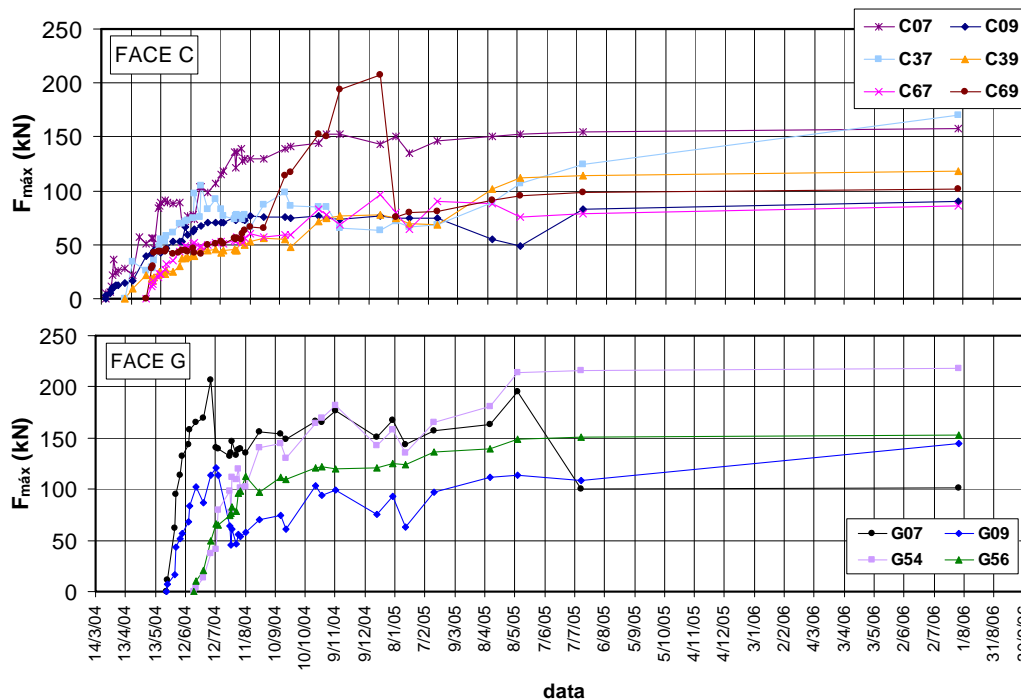


Figura 175. Força de tração máxima ( $F_{\text{m\acute{a}x}}$ ) durante todo o monitoramento.

A magnitude da força de tração nos grampos é maior nos reforços da face inferior. Esta observação é facilmente compreendida já que os maiores deslocamentos ocorrem nesta região, acarretando em uma maior mobilização dos grampos.

A determinação dos esforços axiais máximos durante a escavação em solo grampeado faz-se necessária para a segurança da obra. O monitoramento destas solicitações possibilita ao projetista e executor um melhor entendimento do comportamento da massa de solo reforçada e auxilia-os a tomarem decisões durante o curso da obra. A Figura 176 indica a magnitude de  $F_{\text{m\acute{a}x}}$  normalizada para a força de escoamento do aço ( $F_{\text{esc}}$ ). Os resultados são apresentados para sucessivos estágios de escavação normalizados ( $H_{\text{escav}}$ =altura da etapa de escavação e  $H$ =altura total da escavação). São definidos diferentes valores de  $z/H$ , onde  $z$  é a cota de instalação do grampo.

Os gráficos apresentados na Figura 176 indicam que há uma verticalização das curvas ( $F_{\text{m\acute{a}x}} / F_{\text{esc}}$ ) vs. ( $H_{\text{escav}} / H$ ) para valores de  $z/H > 0,62$ , os quais representam os reforços da face subvertical. As curvas de  $z/H = 0,78$  e  $z/H = 0,89$  fornecem um maior acréscimo de força axial para um mesmo estágio de escavação. A estimativa do parâmetro ( $F_{\text{m\acute{a}x}} / F_{\text{esc}}$ ) é mais realista quando  $0,55 < z/H < 0,85$ , não havendo boa concordância com os resultados obtidos no final da escavação ( $H_{\text{escav}} / H = 1,0$ ).



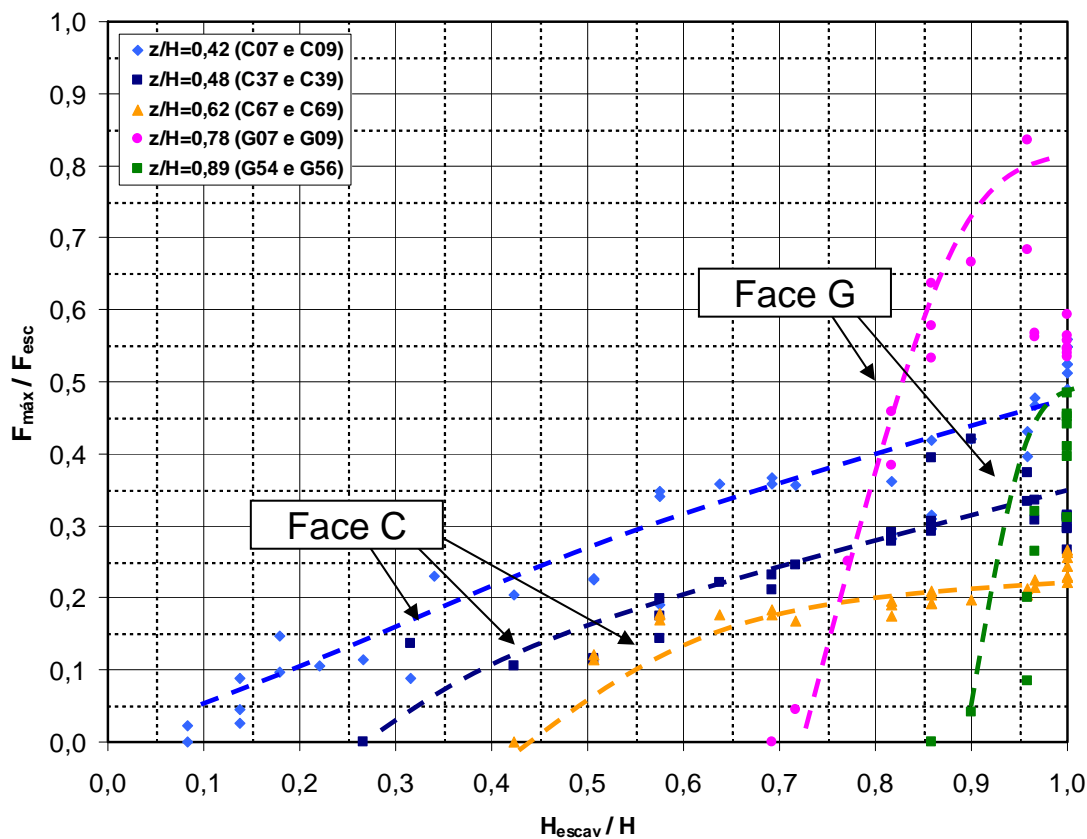


Figura 176. Força de tração máxima normalizada ( $F_{máx} / F_{esc}$ ) durante a escavação em solo grampeado.

A partir do tratamento estatístico do conjunto de valores de ( $F_{máx} / F_{esc}$ ) e ( $H_{escav} / H$ ) indicados na Figura 176, pode-se definir uma relação que represente o desempenho de um determinado reforço, independente da sua cota de instalação (Figura 177). Os valores apresentados englobam o monitoramento até 715 dias após a conclusão da obra. O valor de  $F_{máx}$  pode ser determinado em qualquer etapa da obra.

A curva apresentada apresenta razoável concordância com os valores medidos. A força axial máxima aumenta de forma exponencial com o avanço da escavação.

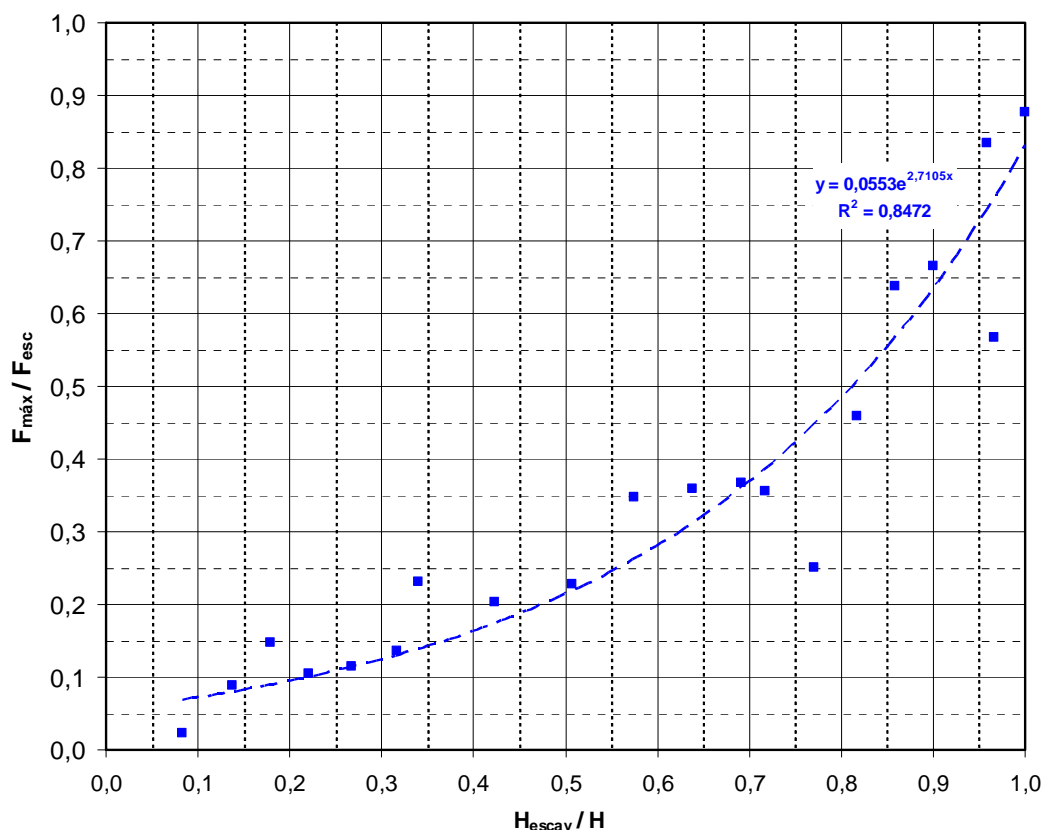


Figura 177. Força de tração máxima normalizada ( $F_{\text{máx}} / F_{\text{esc}}$ ) em escavação grampeadas em solo residual de gnaiss.

### 6.3.5. Comparação dos valores de tração medidos com os estimados na fase de projeto

Na fase de projeto, a forma de distribuição dos esforços axiais ao longo do grampo, pode ser estimada pela proposta da FHWA (Lazarte et al., 2003) apresentada na Figura 46. O valor de  $T_{\text{máx}}$  é calculado a partir da resistência do grampo ( $R_T$ ), resistência à ruptura na face ( $R_F$ ) ou resistência ao arrancamento solo-grampo ( $R_P$ ). Na prática, a  $T_{\text{máx}}$  de um determinado reforço é função da localização do ponto de interseção da superfície de ruptura com o grampo. Depende do comprimento do grampo na zona passiva ( $L_p$ ).

Na maioria dos projetos de solo grampeado, os esforços de tração em cada reforço são obtidos a partir das análises de estabilidade em equilíbrio limite. As solicitações são consideradas constantes ao longo da barra. Os resultados da instrumentação dos grampos já indicam que esta consideração não é válida, pois a distribuição das solicitações axiais varia com a orientação dos grampos, geometria do talude e geologia do local. Além disso, muitos projetos consideram

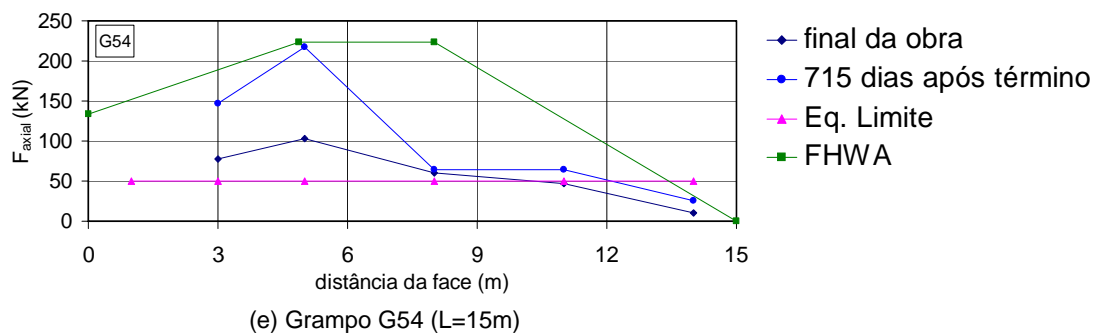
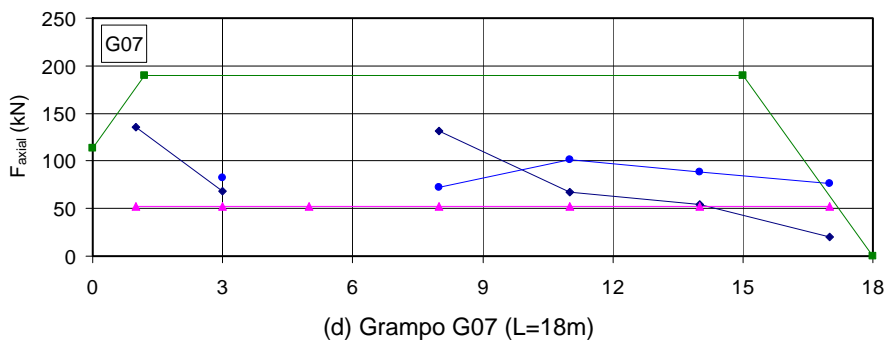
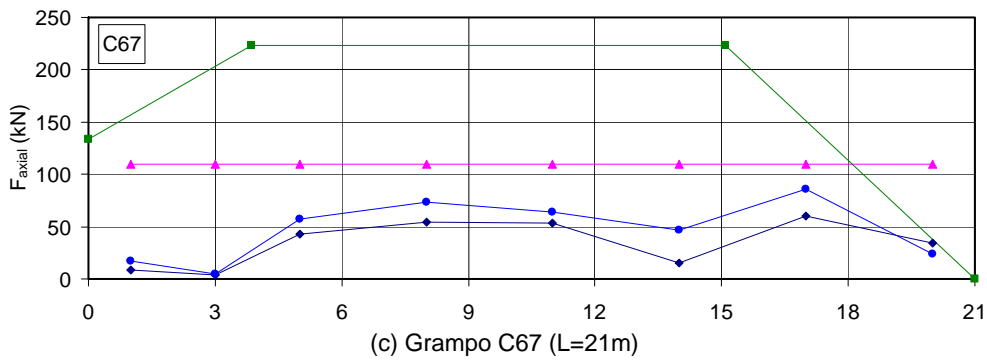
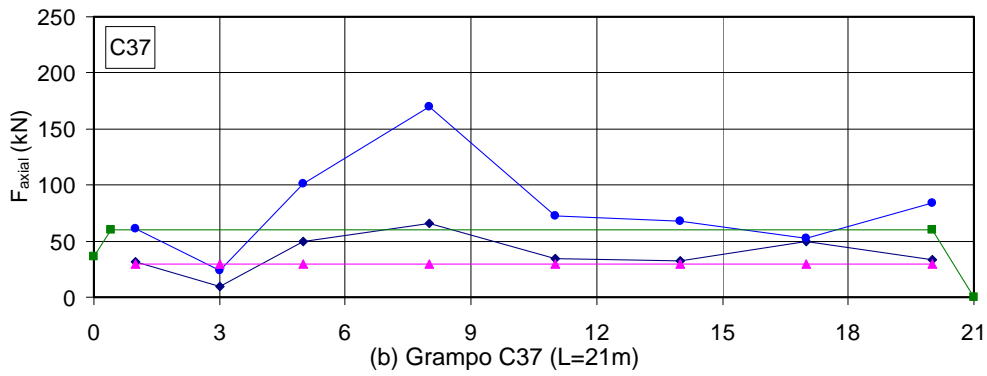
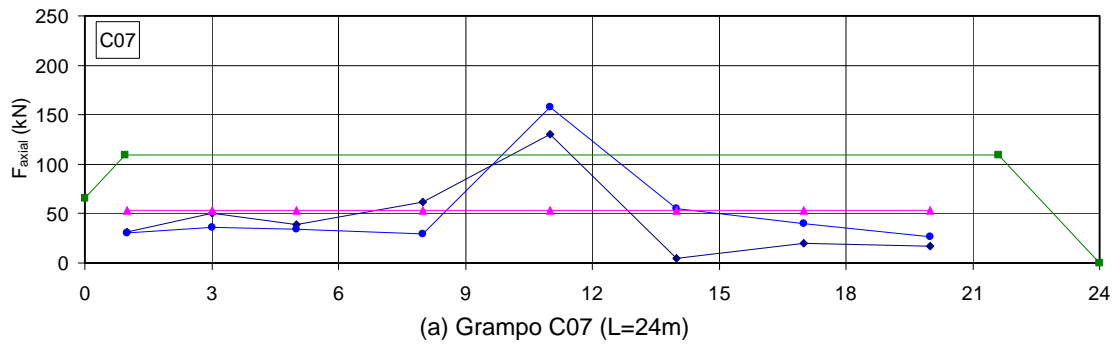
um valor de  $q_s$  constante com a profundidade embora resultados de ensaios de arrancamento em solos residuais de gnaiss (Proto Silva, 2005; Springer, 2006), indiquem que esta hipótese não é válida.

Um estudo comparando os valores de tração medidos na instrumentação com os estimados na fase de projeto, pela proposição da FHWA e pelas análises em equilíbrio limite, é o objetivo deste item.

A magnitude dos esforços axiais nas análises de equilíbrio limite refere-se à Solução 16 (condição saturada), indicada na Figura 148. Os resultados fornecidos pela instrumentação dos grampos representam duas fases importantes da obra: final da construção e final do monitoramento (715 dias após a construção). As estimativas de  $F_{axial}$  realizadas pela proposição da FHWA (Lazarte et al., 2003) estão detalhadas no item 3.2.3 (Figura 46).

A Figura 178 ilustra os resultados obtidos para as diferentes hipóteses de cálculo na coluna instrumentada A. De uma forma geral, esta figura indica uma incompatibilidade dos diagramas de esforços axiais obtidos entre a proposição da FHWA, equilíbrio limite e instrumentação de campo (final da obra). A diferença de comportamento é menos significativa no grampo C37 (Figura 178b) e mais acentuada no grampo C67 (Figura 178c).

Os diagramas de tração dos grampos obtidos pela proposição da FHWA assumem uma forma trapezoidal. A magnitude das solicitações é conservadora já que, a força de tração máxima equivale à resistência do grampo ( $R_T$ ), resistência à ruptura na face ( $R_F$ ) ou pela resistência ao arrancamento solo-grampo ( $R_P$ ), conforme ilustrado na Figura 46. Nos grampos C67 e G54 o mecanismo foi definido pela resistência da barra ( $R_T$ ). Nos demais reforços, pela resistência ao arrancamento do grampo ( $R_P$ ). Os valores de  $F_{axial}$  estimados na fase de projeto correspondem ao limite superior da mobilização dos reforços. Para o grampo C67 por exemplo, é cerca de 4 vezes superior ao resultado fornecido pela instrumentação (final da construção a 8m da face). Depende do valor de  $L_p$  fornecido pelas análises de estabilidade em equilíbrio limite. Com exceção do grampo C37 (Figura 178b) e C07, a 11m da face (Figura 178a), todas as barras instrumentadas seriam mais solicitadas segundo esta hipótese de cálculo.



- ◆ final da obra
- ◆ 715 dias após término
- ▲ Eq. Limite
- FHWA

Figura 178. Distribuição dos esforços axiais nos grupos (4 hipóteses de cálculo).

As análises em equilíbrio limite (Figura 178) consideram que a mobilização do grampo assume uma forma retangular. Seu valor é constante ao longo do trecho ancorado e é função do diâmetro do furo ( $\phi_{\text{furo}}$ ), comprimento do grampo no trecho ancorado ( $L_p$ ) na região passiva e da resistência ao cisalhamento solo-grampo ( $q_s$ ). Os valores obtidos nestes estudos não são consistentes com a interpretação da instrumentação de campo (final da construção). Com exceção do grampo C67 (Figura 178c), os valores da força axial obtidos pelas análises de estabilidade são sempre inferiores àqueles apresentados pela instrumentação de campo (no grampo G07, é cerca de 2,6 vezes menor). Isto se deve ao fato, já comentado, de que as análises de equilíbrio limite não consideraram a geologia complexa do maciço, tampouco a seqüência da escavação. Em projetos de escavação em solo grampeado, é mais correto estimar os esforços nos grampos com o auxílio de ferramentas numéricas (Lima, 2002). Os resultados obtidos devem ser comparados (e aferidos) com as respostas da instrumentação de campo (que é recomendada neste tipo de obra).

As diferenças nos resultados da instrumentação dos grampos (Figura 178) indicam que os grampos continuam sendo mobilizados, após o término da escavação. A distribuição de tensões assume uma forma variável conforme comentado no item 6.3.3. Esta observação é mais evidente nos grampos C37 (Figura 178b) e G54 (Figura 178e), a 8m e 5m da face escavada, respectivamente.

As tensões cisalhantes no contato solo-grampo crescem com a maior mobilização dos reforços. A Figura 179 quantifica este aumento em função da porcentagem de  $q_s$  mobilizada. É interessante notar que no final da construção, as tensões cisalhantes no contato solo-grampo (obtidas pela instrumentação) são inferiores a 25% do valor de  $q_s$  do projeto. A maior mobilização acontece na 1ª linha de grampos das faces C e G. Após o término da escavação e início da obra vizinha, observa-se um aumento geral na mobilização de  $q_s$ , sendo este mais significativo no grampo G54. Entretanto, em todos os reforços, o valor da tensão cisalhante solo-grampo é menor que 35% da resistência ao cisalhamento na interface ( $q_s$ ).

Com se verificou nas Figuras 178 e 179, o processo de acomodação da massa de solo grampeado não termina com o fim da escavação. Desta maneira, sugere-se que programas de instrumentação de campo de taludes grampeados não sejam interrompidos após a conclusão da obra. No caso estudado, o tempo de monitoramento após o fim da escavação foi de 715 dias. Somente nesta data,

observou-se uma tendência de estabilização das leituras fornecidas pelos “strain-gauges” e inclinômetros.

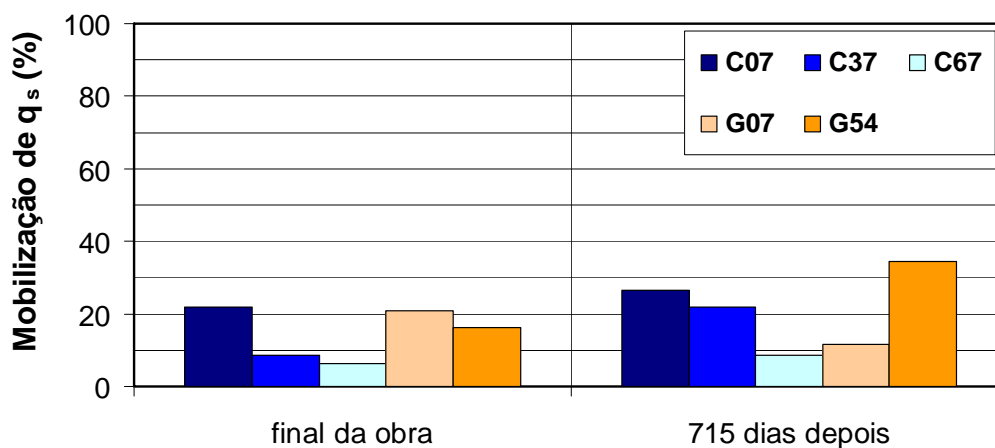


Figura 179. Mobilização da resistência ao cisalhamento solo-grampo ( $q_s$ ).

### 6.3.6. Tração na face

A determinação do valor da força de tração na face ( $T_o$ ) torna-se importante em projetos de taludes em solo grampeado. Seu valor deve ser determinado para o dimensionamento do revestimento em concreto projetado. A parede da escavação tem importante contribuição na estabilidade local do solo próximo à face. Ela poderá ser calculada como laje flexível com carga uniformemente distribuída (Clouterre, 1991; Lazarte et al., 2003).

Para o cálculo da força de tração na cabeça do grampo ( $T_o$ ), a presente pesquisa apresentou as sugestões da FHWA, definidas pela equação (7). Experimentalmente, Byrne et al. (1998) verificaram que, em serviço, o valor de  $T_o$  varia entre 0,6 a 1,0 de  $T_{m\acute{a}x}$ . Os resultados da instrumentação dos grampos pretendem verificar estas recomendações. Serão utilizados os valores fornecidos pelos “strain-gauge” SG0, que está posicionado próximo à face da escavação ( $x=1m$ ). A tração na face ( $T_o$ ), em cada profundidade, é o maior valor dos medidos pelos “strain-gauges” SG0 das colunas A e B. Os valores de  $T_{m\acute{a}x-s}$ , da equação (7), foram obtidos nas análises de equilíbrio limite. A força de tração máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) resulta da interpretação dos resultados da instrumentação dos grampos.

A interpretação das leituras fornecidas pelo “strain-gauge” SG0 indicou que relação de ( $T_o/T_{m\acute{a}x}$ ) varia com a profundidade de instalação do reforço ( $z$ ) normalizada pela altura total da escavação  $H$  (Figura 180). Não existe uma relação direta entre os parâmetros  $T_o/T_{m\acute{a}x}$  e  $z/H$ , já que a relação entre  $T_o/T_{m\acute{a}x}$

depende da rigidez do solo, rigidez e inclinação da face, rigidez dos grampos, além do espaçamento e profundidade dos reforços.

Os resultados apresentados na Figura 180 indicaram que, no final da construção, o valor da tração na face ( $T_o$ ) dos grampos G07 e G09 ( $z/H=0,78$ ) foi igual à tração máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ). Entretanto, para a grande faixa de valores de  $z/H$ , o valor de  $T_o$  (final da construção e em serviço) equivale a 0,3 a 0,6 de  $T_{m\acute{a}x}$ . Estas relações não concordam com os resultados experimentais apresentados por Byrne et al. (1998). Em obras de reforço de solos empregando a técnica de Terra Armada, a magnitude de  $T_o$  oscila entre 0,4 a 0,5 de  $T_{m\acute{a}x}$  (Clouterre, 1991).

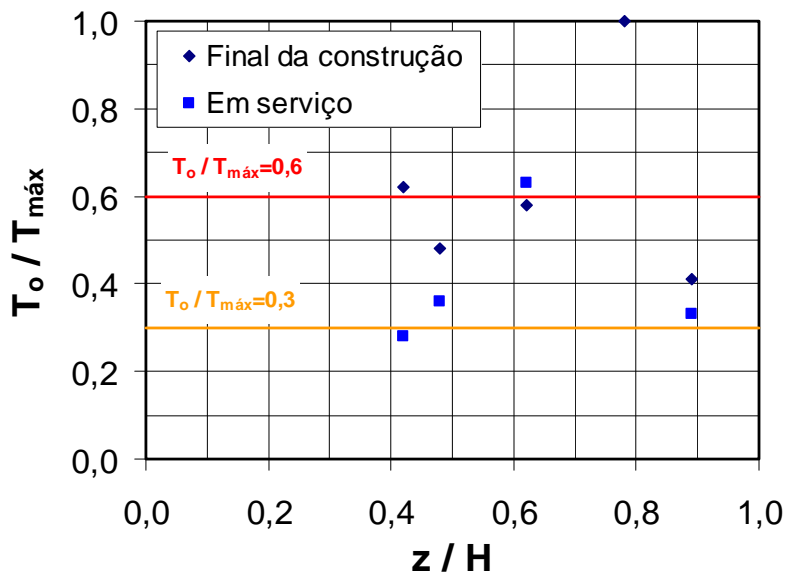


Figura 180. Relação entre a tração na face ( $T_o$ ) e tração máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) vs. profundidade ( $z$ ) do reforço normalizada pela altura total da escavação ( $H$ ).

Uma comparação entre os valores de tração na face obtidos pela instrumentação (final da construção e em serviço) e os calculados pela proposição da FHWA é apresentada na Figura 181.

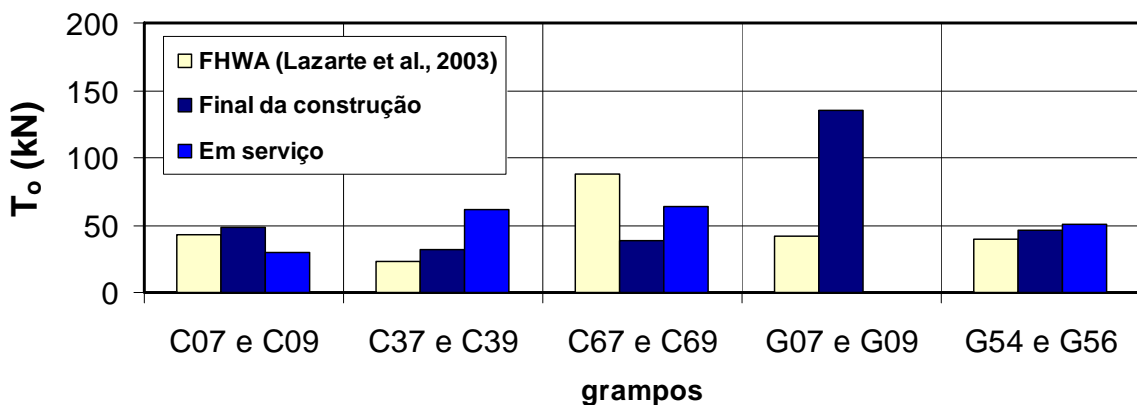


Figura 181. Comparação entre as forças de tração medidas na face do talude ( $x=1m$ ), ao final da construção e em serviço e as calculadas pela FHWA.

No final da construção (Figura 181), observa-se que os valores de  $T_o$  estimados pela proposição da FHWA não apresentam boa concordância com a instrumentação, para  $0,62 < z/H < 0,78$ . Este intervalo de valores representa a região entre a última linha de grampos instrumentados da face C e primeira linha da face G. Nesta área, é interessante mencionar que os deslocamentos fornecidos pelos inclinômetros são máximos no término da escavação e final do monitoramento (em serviço).

A magnitude de  $T_o$  (no final da escavação) é maior nos grampos da face G, cuja inclinação é mais acentuada ( $\beta=85^\circ$ ). A tensão máxima equivalente aos grampos G07 e G09 situa-se a 1m da face do talude. Na face G, a densidade de grampos é menor ( $\cong 1$ grampo/ $3m^2$  de face) que na face C (1grampo/ $4m^2$  de face) o que significa que não há contribuição da densidade do grampeamento no valor de  $T_o$ . Acredita-se que a maior mobilização da tração na face inferior está relacionada com a geometria do talude e com o processo construtivo.

Com exceção da 1ª linha de grampos da face C, a instrumentação indicou que a tração na face aumentou após o término da obra. O início da escavação vizinha e a acomodação da massa grampeada também são percebidos na região próxima à face de concreto projetado. O acréscimo de tensão, a 1m da parede, foi mais significativo nos grampos C37 e C39 (cerca de 94%). Após a construção, não foi possível monitorar o desempenho dos grampos G07 e G09 (na face) devido ao funcionamento instável do SGO.

### **6.3.7. Estado de tensões no maciço grampeado**

O estado de tensões do maciço de solo grampeado foi avaliado a partir do procedimento detalhado do item 3.2.4. Com o valor de  $T_{m\acute{a}x}$  obtido para cada grampo no final da construção e em serviço (última medição), foi possível comparar as tensões horizontais mobilizadas no maciço, com aquelas definidas para o Estado Ativo (Rankine) e de Repouso. Para a validação deste estudo, algumas hipóteses de cálculo foram definidas:

- Atrito nulo entre o terrapleno e a parede em concreto projetado;
- Solo homogêneo e isótropo;
- Nível do terreno horizontal.

A Figura 182 mostra a variação das tensões máximas mobilizadas, nos grampos instrumentados, com a profundidade ( $z_p$ ). Para cada ponto definido, o



valor de  $T_{m\acute{a}x}$  equivale ao maior esforo axial dentre os reforos das colunas A e B. As linhas que correspondem ao Estado Ativo ( $K_a$ ) e de Repouso ( $K_o$ ) do macio foram definidas a partir da Teoria de Rankine (Lambe e Whitman, 1969). Os parâmetros do solo empregados nas análises foram aqueles obtidos a partir dos ensaios triaxiais, em corpos de prova na condio de umidade natural.

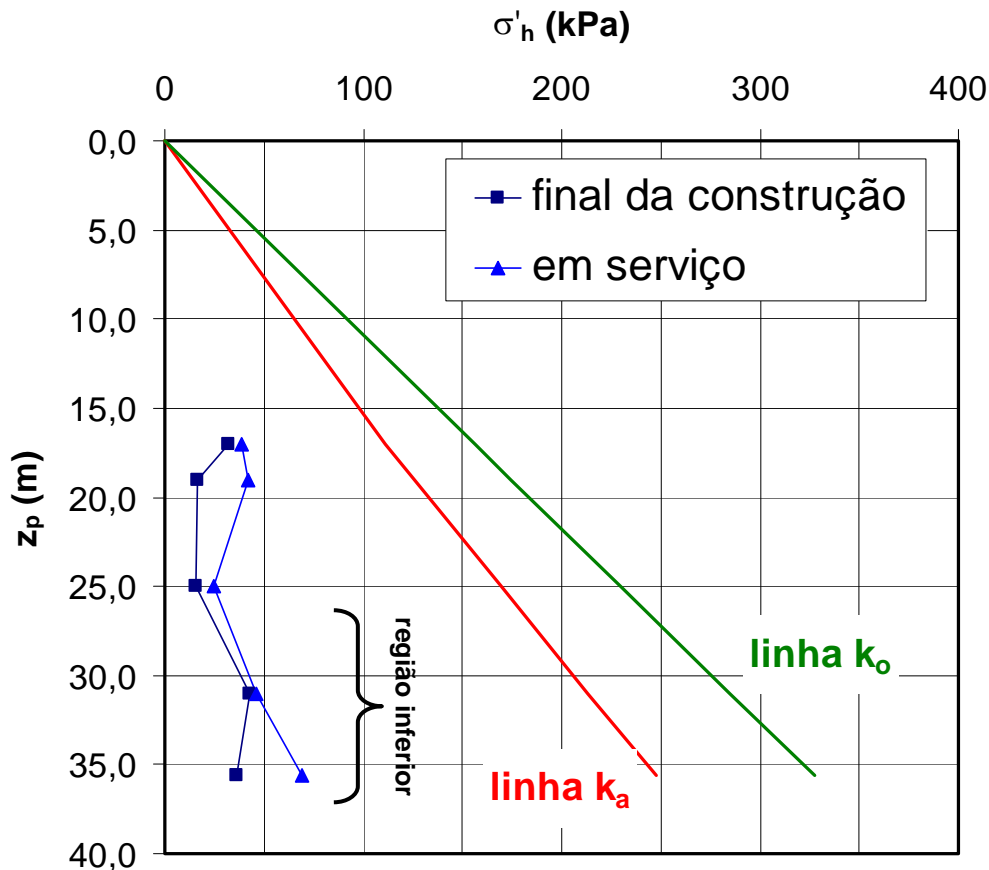


Figura 182. Variao da fora de trao máxima nos grampos com a profundidade (final da construo e em servio).

A Figura 182 indica que os grampos desenvolvem tensões horizontais menores que aquelas relacionadas ao estado ativo (linha  $K_a$ ), sendo esta observao mais evidente no final do monitoramento. Na base da escavao o valor de  $\sigma'_h$  se afasta ainda mais do estado ativo (linha  $K_a$ ). Este fato é associado a um efeito (suave) de arco no talude grampeado em funo do processo executivo da técnica (Clouterre, 1991). O arqueamento reduz as tensões máximas na base da escavao ( $K \ll K_a$ ) e promove um aumento no topo ( $K > K_o$ ). Observa-se também que as tensões máximas nos grampos não são constantes e variam com a profundidade.

O efeito de arco não é mais evidente devido à aplicao de uma carga de incorporao ( $T_i=100\text{kN}$ ) nos grampos inferiores (Face G). Este procedimento

modificou o estado de tensões na região inferior do talude, promovendo uma redução das forças de tração máximas mobilizadas nos grampos inferiores.

As observações desta pesquisa apresentam certa semelhança com os experimentos conduzidos em obras instrumentadas, modelos em escala reduzida e análises numéricas encontrados na literatura (Plumelle et al. 1990; Clouterre, 1991; Shiu, 1997).

Um resumo com os resultados das forças axiais máximas, em cada reforço, é apresentado na Figura 183. Os esforços axiais máximos foram normalizados para os valores de peso específico do solo ( $\gamma$ ), espaçamento horizontal e vertical entre grampos ( $s_h$  e  $s_v$ ) e pelo coeficiente de empuxo ativo ( $K_a$ ), calculado anteriormente. Os resultados estão relacionados com as condições de serviço da estrutura e foram plotados em função da cota de instalação dos grampos ( $z$ ) normalizada para a altura do talude ( $H$ ).

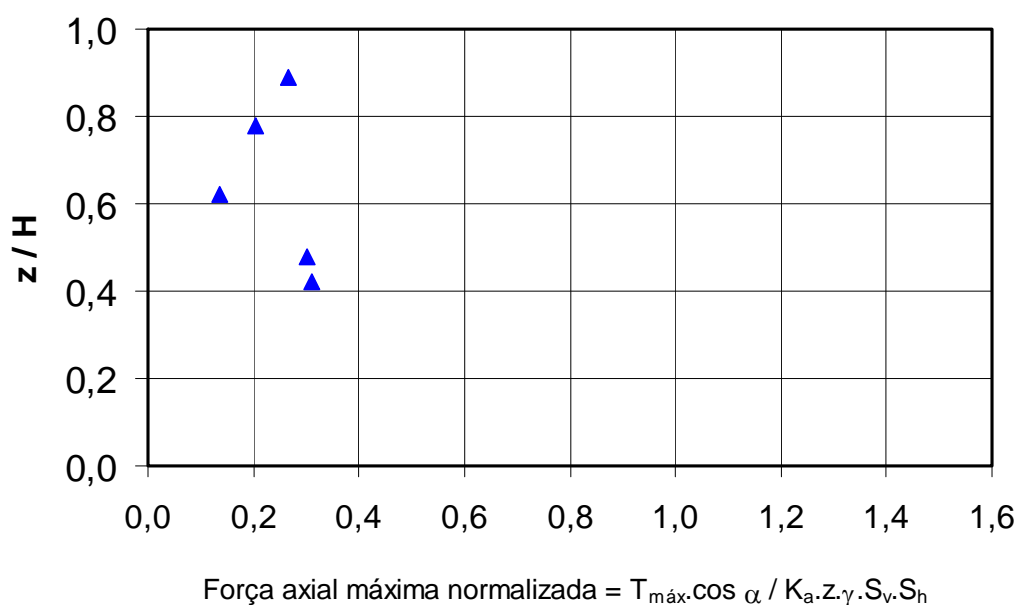


Figura 183. Força axial máxima normalizada ( $F_{m\acute{a}x}^N$ ) vs.  $z/H$  para a estrutura em serviço.

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 183 indicam que a força normalizada varia com a relação  $z/H$ . Na face superior (face C), seu valor varia de 0,14 a 0,27. Na base da escavação (face G), a força normalizada é equivalente a 0,30. É interessante mencionar que os resultados são bem diferentes daqueles reportados por Byrne et al. (1998) e ilustrados na Figura 47. Naquele estudo, os autores verificaram que a força normalizada variou aproximadamente com a profundidade entre 0,4 a 1,1.

Os resultados observados na Figura 183 indicam uma relação que pode ser utilizada, em termos práticos, para definir a força axial máxima observada no talude em serviço (equação (35)).

$$T_{\text{máx}} = 0,30 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot Z \cdot S_h \cdot S_v \quad \text{eq.(35)}$$

Nota-se que para valores de  $z/H$  entre 0,6 e 0,8, o valor de  $T_{\text{máx}}$  estimado pela equação (35) é mais conservativo.

### 6.3.8. Influência de alguns aspectos executivos

O processo de execução de escavações em solo grampeado, detalhado nos capítulos 2 e 3, tem grande influência no comportamento da massa de solo reforçado. A magnitude dos deslocamentos do talude e a mobilização dos esforços axiais nos grampos dependem, entre diversos fatores, da: velocidade da escavação e altura escavada em cada estágio, intervalo de tempo entre escavação e injeção dos grampos, precipitação pluviométrica, carga de incorporação nos grampos ( $T_i$ ) e remoção de suporte lateral de solo (desconfinamento lateral).

A partir dos registros do processo executivo no “diário de obra” e dos resultados da instrumentação e monitoramento geotécnico, foi possível avaliar cada uma destas variáveis supracitadas no comportamento da escavação em solo residual de gnaiss. A discussão dos resultados destes estudos é apresentada a seguir:

#### i. Processo de escavação acelerada

Em geral, o processo de execução de escavações em solo grampeado é realizado em 3 etapas seqüenciais: escavação do talude, instalação dos grampos e concretagem da parede.

O processo de escavação é realizado em fases (incrementos ou estágios de escavação) ao longo de toda a extensão do talude. A altura de solo a ser removido não deve exceder os limites definidos pela Tabela 3, variando de 1m a 2m. Imediatamente após a escavação, inicia-se a execução dos grampos e da parede em concreto projetado.

Entretanto, algumas vezes a seqüência executiva não é respeitada por uma série de fatores: dificuldades no controle da operação das escavadeiras,

período de recesso na obra (final de semana e feriados), paralisação dos serviços devido às chuvas, demora na chegada de caminhões com concreto, etc.

Nesta pesquisa, foi observado no período de 27/05/04 a 02/06/04 um processo de escavação acelerada na Face G, com altura escavada de 2,40m sem injeção de grampos (Figura 184). A seqüência construtiva, neste período, pode ser visualizada nas Figuras 94, 96, 99 e 101.

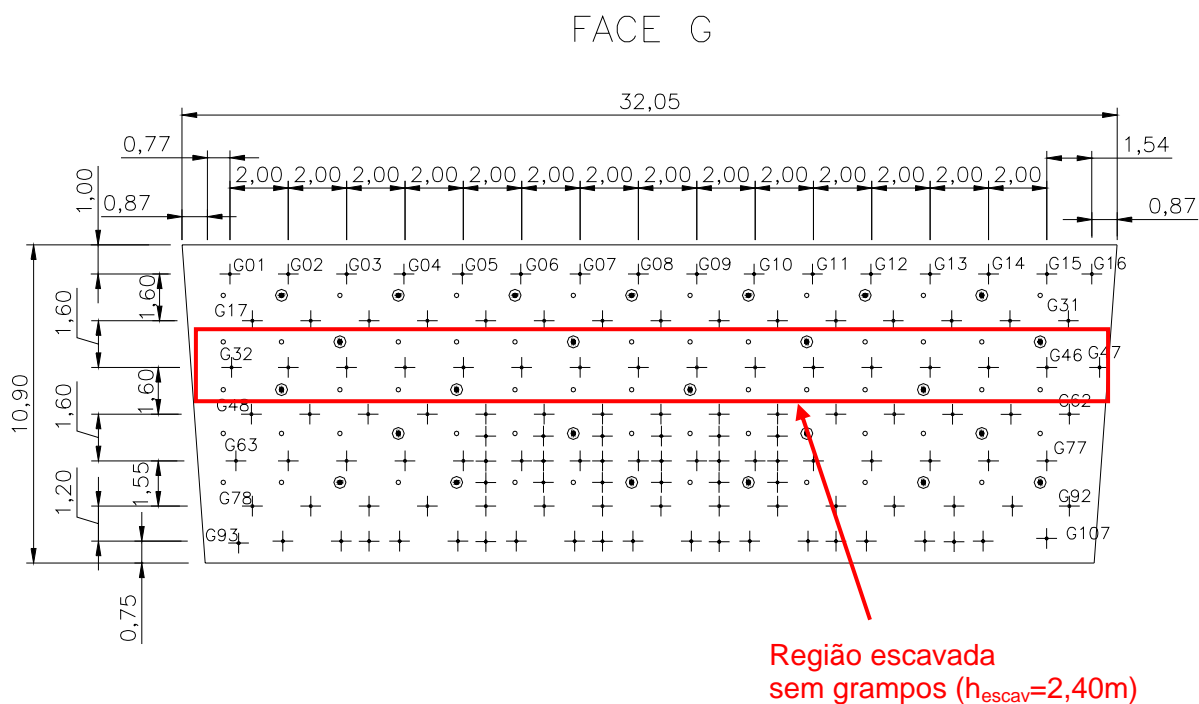


Figura 184. Vista do talude grampeado - Face G.

O monitoramento do talude neste intervalo permitiu avaliar a influência do processo acelerado da escavação (sem injeção de grampos) no comportamento do maciço. A Figura 185 apresenta os deslocamentos horizontais fornecidos pelos inclinômetros, no período de interesse.

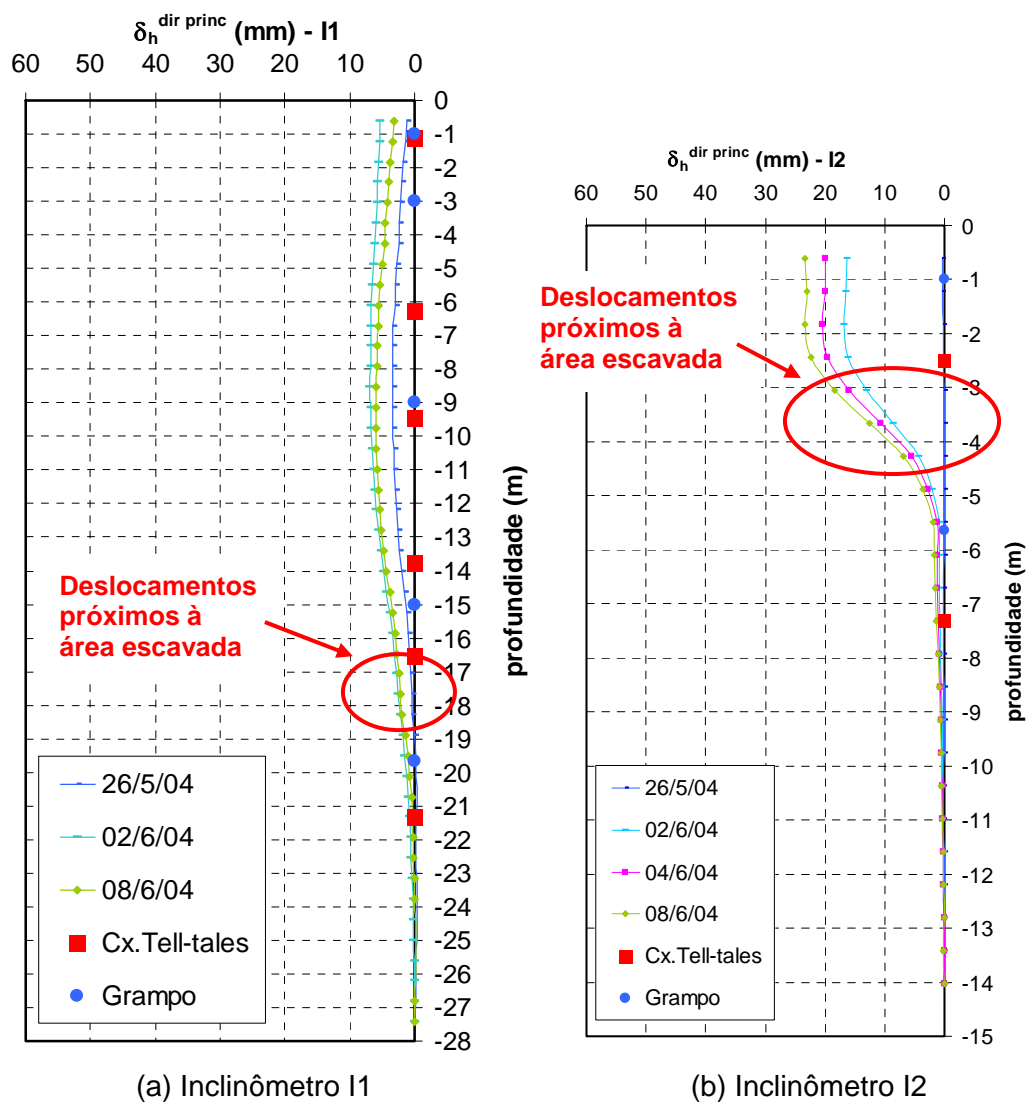


Figura 185. Deslocamentos horizontais na direção principal.

Os resultados fornecidos pelos inclinômetros (Figura 185) indicam que o processo de escavação acelerado acarretou maior movimentação do maciço na base do talude (cota: +38). A região mais afetada por este processo é aquela próxima à face da escavação (inclinômetro I2, Figura 185b). Os deslocamentos na face G aumentaram razoavelmente no período entre 26/05/04 a 02/06/04. Na face superior e no interior da massa de solo grampeado (Figura 185a), o processo de escavação acelerado não provocou grandes movimentações no maciço. Os deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” confirmaram a influência da escavação na movimentação da massa grampeada. Os resultados obtidos pelos “tell tales” das 3 caixas instaladas na ocasião (Figura 186) informaram uma maior movimentação nos “tell tales” mais próximos da área escavada (caixa 3).

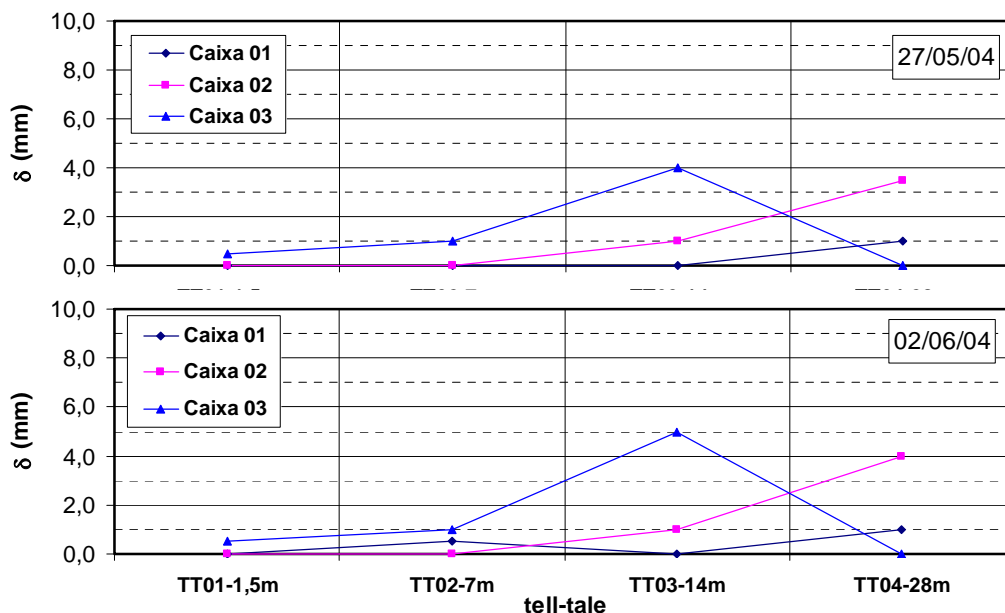


Figura 186. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” durante o processo de escavação acelerada.

O desempenho dos grampos no final de Maio e início de Junho é apresentado na Figura 187. Os resultados dos grampos instrumentados G54 e G56 não estão ilustrados nessa figura pois os mesmos não haviam sido instalados.

A mobilização dos esforços axiais aumenta com o avanço da escavação (Figura 187). A variação da tração nos grampos durante o período de escavação acelerada apresenta certa consistência, com exceção dos grampos inferiores instrumentados. O aumento dos esforços axiais nos reforços G07 e G09 entre 25/05/04 e 03/06/04 acusam a influência da fase crítica no comportamento do talude grampeado. O estágio de escavação de 2,30m de altura (sem grampos) promove uma maior solicitação dos reforços mais próximos (G07 e G09) à área escavada. A partir do limite superior de, aproximadamente  $40 \cdot \phi_{\text{furo}}$ , a influência da escavação acelerada é menos significativa. Nesta região o grampeamento do solo já se encontra concluído.

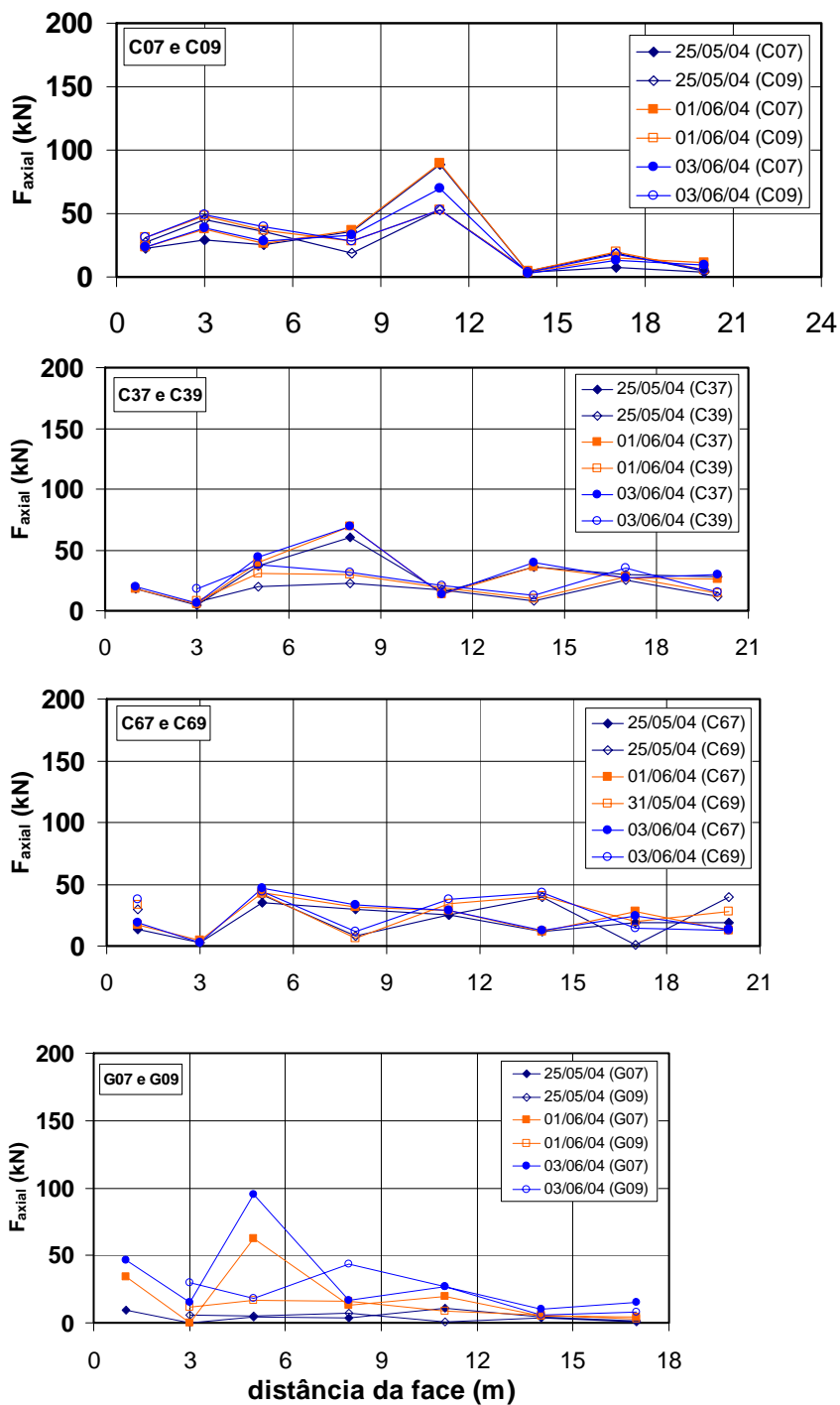


Figura 187. Mobilização dos grampos instrumentados durante o processo de escavação acelerada.

Resumidamente, o estágio de escavação de 2,40m de altura (sem grampos) acarretou em uma aceleração dos deslocamentos da massa de solo grampeado e, conseqüentemente, em uma maior mobilização dos grampos. A influência da seqüência de escavação acelerada foi mais significativa na base da escavação (Face G). Ressalta-se que estas observações só foram possíveis por

causa da instrumentação geotécnica do maciço, com monitoramento diário dos deslocamentos do talude e esforços axiais nos grampos.

Com base no exposto acima, recomenda-se iniciar o grampeamento do solo e a face de concreto projetado imediatamente após a etapa de escavação. Para cortes verticais, cada estágio de escavação deve respeitar os limites preconizados pela Tabela 3. Em escavações verticais em solo residual de gnaiss, a altura de escavação recomendada deve ser inferior a 1,30m. Recomenda-se que durante a execução seja realizado acompanhamento dos deslocamentos horizontais (principalmente da face da escavação), com marcos superficiais, inclinômetros e/ou “tell tales”. Se possível, deve-se monitorar o comportamento dos grampos durante o processo executivo. Este acompanhamento ajuda a tomar medidas corretivas, durante a construção, caso seja observado alguma anomalia no comportamento do maciço. Um exemplo de uma ação desta natureza é descrito a seguir.

## **ii. Escavação em bancadas**

Um procedimento usual para minorar os deslocamentos horizontais do talude em solo grampeado e a mobilização dos grampos foi empregado na obra estudada. Consiste na realização da escavação em bancadas (Figura 6). Este procedimento foi utilizado a partir do mês de Junho quando a instrumentação indicava uma aceleração na movimentação do talude, mesmo quando não havia escavação na obra (08/06/04 até 22/06/04), conforme ilustra a Figura 188. Pode-se observar a eficiência da escavação em nichos no ganho da estabilidade geral do conjunto na fase construtiva. Os deslocamentos horizontais máximos fornecidos pelos inclinômetros reduzem sensivelmente quando se inicia a escavação em bancadas (22/06/04). No caso do inclinômetro I2, esta redução é mais significativa. A escavação em bancadas na face G diminui a velocidade da movimentação da massa de solo grampeado. A velocidade média dos deslocamentos, inicialmente igual a 1,44mm/dia em I2, sofre redução de 60%, alcançando um valor de 0,57mm/dia durante o período de Julho de 2004.



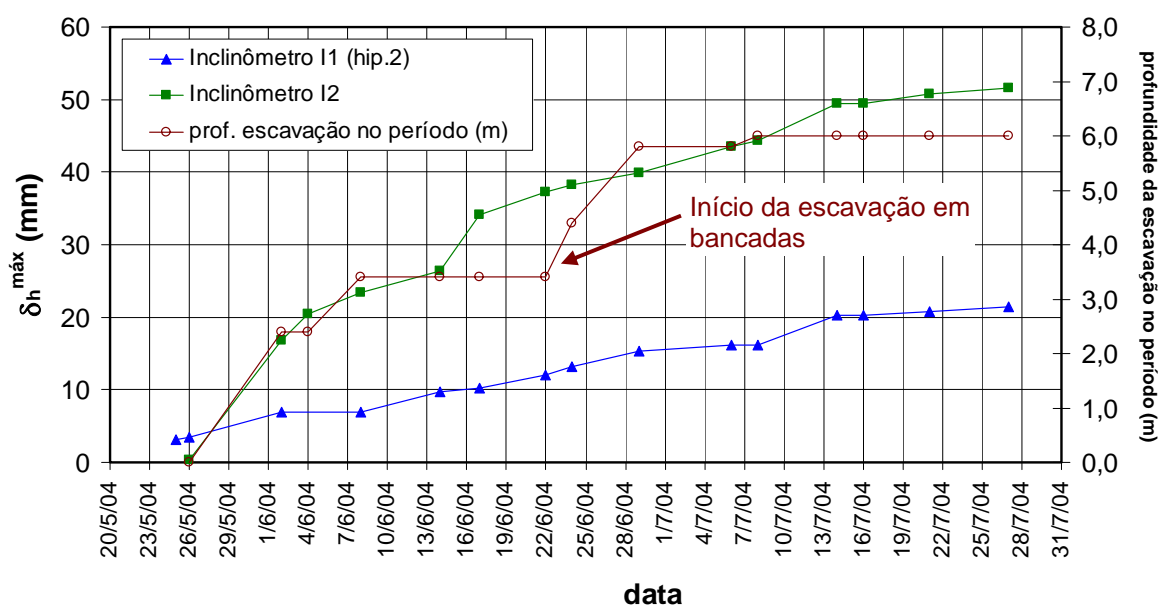


Figura 188. Deslocamentos horizontais máximos no talude (direção principal), período de Maio a Julho de 2004.

O comportamento do grampo G07 (1ª linha da Face G), durante o período de Maio a Julho de 2004, é ilustrado na Figura 189 a qual apresenta a distribuição de  $F_{axial}$ , a 1m da face da escavação.

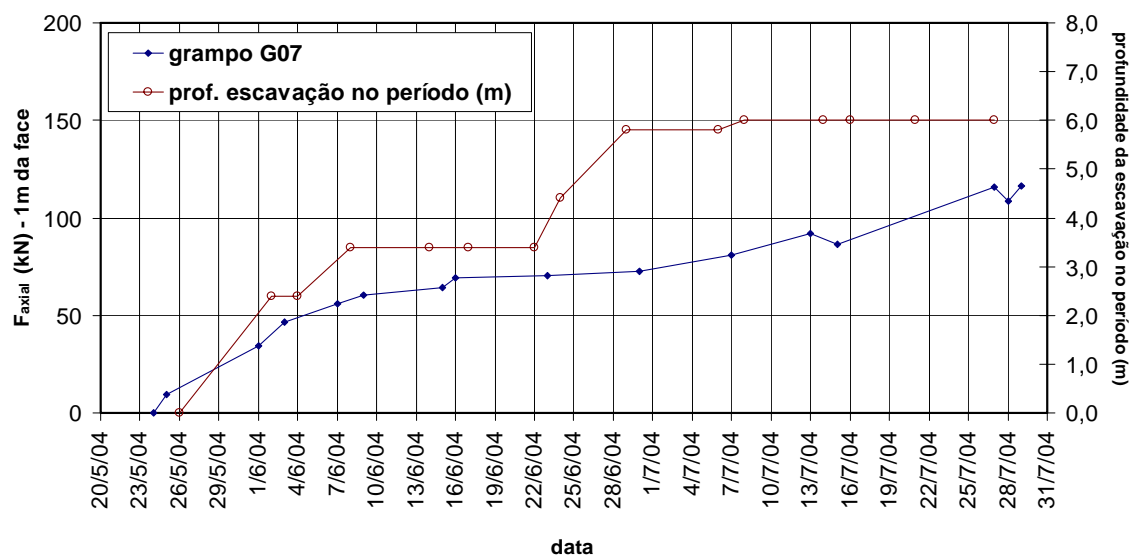


Figura 189. Tração a 1m da face (grampo G07), período de Maio a Julho de 2004.

Pode-se observar que há um aumento da solicitação do reforço com o início da escavação. No período sem movimentação de solo (08/06/04 até 22/06/04), houve mobilização das forças axiais no reforço. Vale ressaltar que, neste intervalo, a mobilização do grampo é reduzida e se prolonga até o início da

escavação em bancada, que começa em 22/06/04. Após 5 dias do início deste processo há um novo crescimento na mobilização do grampo, dado pelo reinício da escavação. A tração na face apresenta taxa de crescimento menor com o início da escavação em bancadas.

Na Figura 189, verifica-se que o aumento da  $F_{axial}$  nem sempre ocorre imediatamente após a execução de uma fase de escavação. Este padrão de comportamento, explicado pelo processo de acomodação do maciço e redistribuição das tensões internas nos grampos, foi atestado nos demais grampos instrumentados, tanto do “Museu 1” quanto do “Museu 2” (Saré, 2007)

### iii. Carga de incorporação nos grampos ( $T_i$ )

Uma outra prática (menos usual) para minorar os deslocamentos horizontais do talude em solo grampeado e a mobilização dos grampos também foi empregada na obra estudada. Resulta da aplicação de uma carga de incorporação que condiciona os “grampos” a não trabalharem mais na condição “passiva”. A carga de incorporação ( $T_i=100kN$ ) foi aplicada em todos os grampos (não instrumentados) das faces F, G e H. As barras de aço receberam placa metálica, rosca e porca. A seqüência de aplicação do carregamento está ilustrada na Figura 101. O procedimento de aplicação de  $T_i$  iniciou-se em 01/06/2004 e foi finalizado em 11/08/2004.

O efeito da aplicação da carga de incorporação no comportamento do talude foi difícil de mensurar. Isto porque a seqüência construtiva da escavação grampeada não permitiu estudar de forma isolada esta variável. Durante os meses de Junho e Agosto de 2004, o intervalo entre as leituras de inclinômetros e grampos (face G) englobaram o efeito da escavação (total e em nichos) e da carga de incorporação. Entretanto, do ponto de vista qualitativo, algumas afirmações podem ser ditas:

- i. Observando-se os deslocamentos horizontais máximos fornecidos pelos inclinômetros (Figuras 163 e 164), constata-se que após o término do processo de aplicação de  $T_i$  (11/08/2004), há uma diminuição na taxa de deslocamentos de I1 e I2 (em média, de 85%), conforme discutido no item 6.3.1. Parte desta parcela de redução pode estar relacionada ao efeito estabilizador que a carga  $T_i$  introduziu no maciço;
- ii. Após a conclusão dos grampos (face G) e aplicação de  $T_i$  (11/08/2004), verifica-se uma tendência de estabilização das cargas dos reforços da face

superior e inferior (Figuras 170 e 171). Observa-se uma redução da mobilização dos grampos a partir desta data. Este comportamento é, em parte, associado à ação estabilizadora da carga de incorporação.

### iii. Precipitação pluviométrica

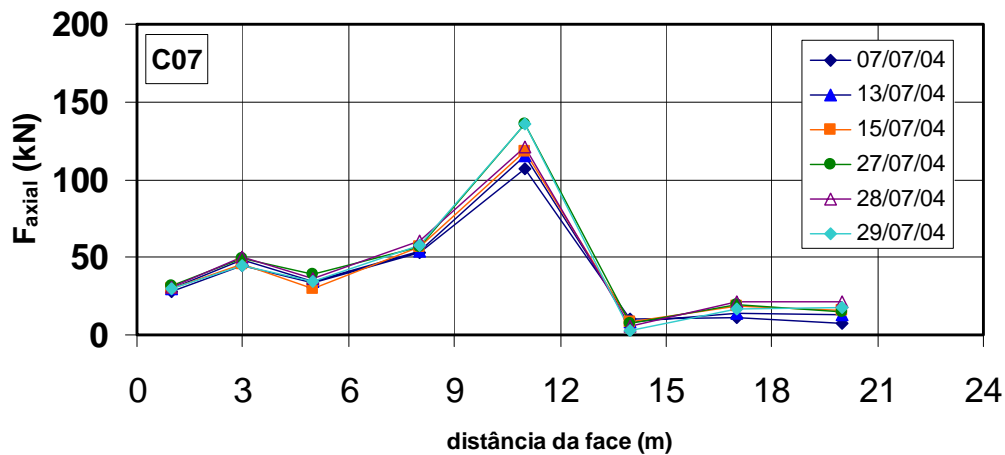
A influência do período de chuvas intensas no comportamento da escavação em solo grampeado foi avaliada a partir dos registros do inclinômetro I1, das 3 primeiras caixas de “tell tales” e dos dados da extensometria na face C. Os registros da instrumentação foram àqueles obtidos no mês de Julho de 2004. Não foi possível determinar a intensidade das chuvas no referido mês, já que não existe estação pluviométrica próxima ao local da obra. No intervalo de 16 a 22 de Julho, chuvas fortes impossibilitaram a realização dos serviços de escavação, perfuração e injeção de grampos no talude. Consta ainda no diário de obra que nas datas de 23 a 26 de Julho não houve movimentação de material do terreno, por causa da quebra de uma peça da escavadeira. O conserto da máquina só foi realizado em 27 de Julho.

O monitoramento das cargas axiais nos reforços durante a época de chuvas fortes é apresentado na Figura 190. Os valores de força axial ao longo do comprimento da barra referem-se aos grampos da coluna A. Os resultados apresentados indicam que a mobilização das cargas axiais pouco são influenciados pela infiltração da água das chuvas. A influência mais significativa da precipitação pluviométrica é observada apenas no grampo da linha superior (C07). O aumento da tração (a 11m da face) é de, aproximadamente, 12% entre 15 de Julho e 27 de Julho. Na data de 29 de Julho, o valor de  $F_{axial}$  é máximo (135,7kN) e, possivelmente, está associado à escavação de cerca de 1,20m (1ª linha - face G), além da infiltração de água no talude.

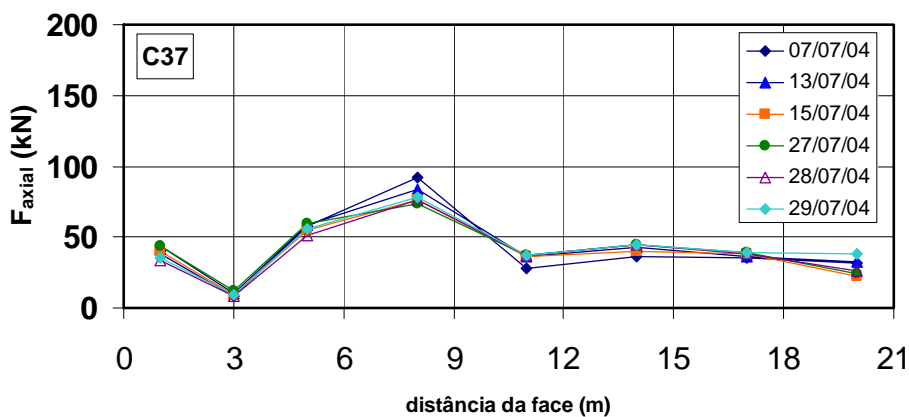
O controle dos deslocamentos horizontais (Figura 191) indica uma movimentação da massa de solo grampeado durante o mês de Julho. Esta movimentação está associada ao processo de infiltração da água das chuvas e ao processo de construção da estrutura (houve escavação e grampeamento do terreno no início e no fim do mês).

A magnitude de  $\delta_h$  é máxima na profundidade de 12,19m (os valores de deslocamentos abaixo do ponto perfurado de I1 foram desprezados). Este ponto não coincide com a cota de instalação do grampo mais mobilizado na ocasião (C07). Este fato pode ser explicado pela seqüência do processo construtivo (Figuras 93 a 101), geologia do maciço e a infiltração de água das chuvas. A

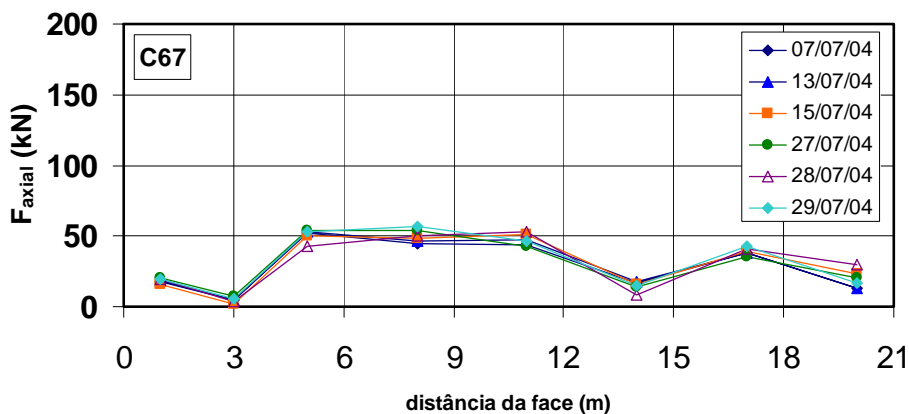
movimentação do maciço durante o período de chuvas é equivalente a 43% da movimentação total no mês de Julho, que foi de 6,0mm. É importante mencionar que, a movimentação horizontal neste mês corresponde a uma parcela pequena (13%) do deslocamento final do talude que foi de 46,9mm.



(a) grupo C07 (cota +52,00)



(b) grupo C37 (cota +50,00)



(c) grupo C67 (cota +44,00)

Figura 190. Monitoramento dos grupos da coluna A - face C durante o período de chuva intensa (Julho de 2004).

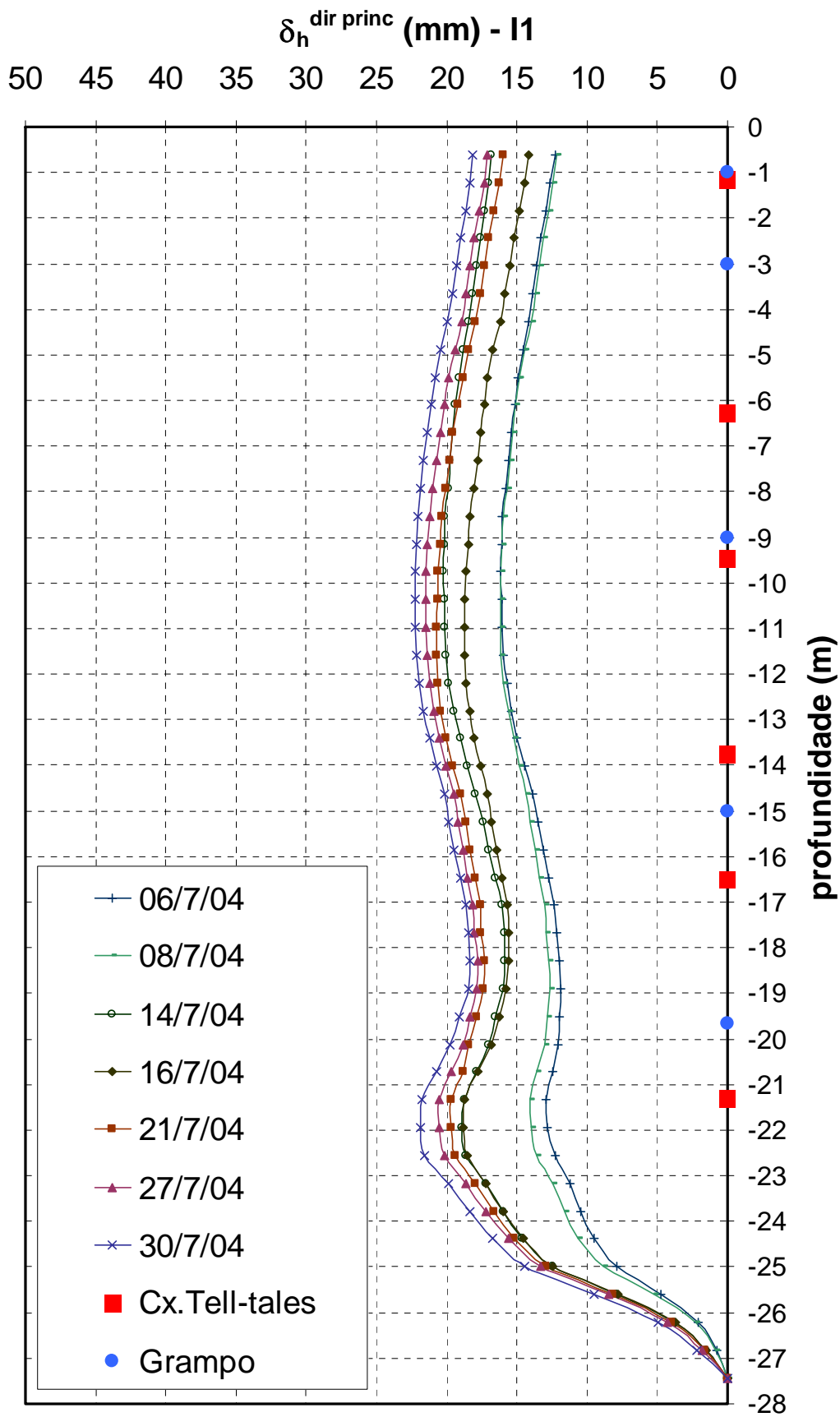


Figura 191. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclínômetro I1 (hipótese 2) em Julho de 2004.

Os deslocamentos obtidos nas 3 caixas de “tell tales” da face C (Figura 192) são compatíveis com aqueles fornecidos pelo inclinômetro I1. O deslocamento máximo é indicado na caixa 3 e corresponde a uma profundidade aproximada de 11m (TT03). No período chuvoso, a movimentação das 3 caixas foi pequena. Os resultados mostraram, mais uma vez, que o processo de infiltração de água no talude, decorrente do período de chuvas intensas, pouco influenciou na movimentação do maciço.

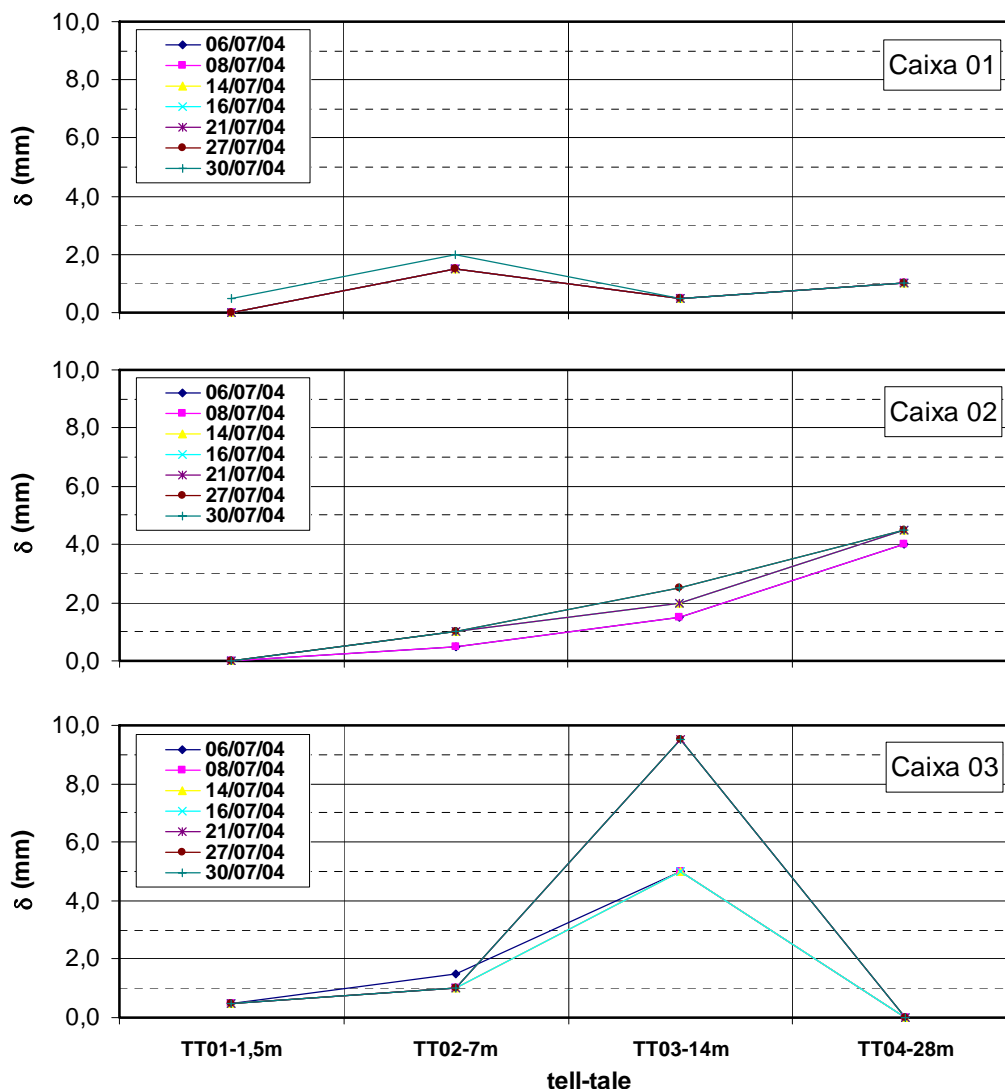


Figura 192. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” em Julho de 2004.

#### iv. Desconfinamento lateral devido à escavação vizinha

O início da escavação vizinha em solo grampeado (11/08/2004) promoveu um desconfinamento lateral da obra estudada. Isto acarretou mudanças no padrão de comportamento do talude, como se observou nos resultados da instrumentação e monitoramento a partir do mês de Agosto de 2004.

A movimentação do maciço de solo grampeado foi influenciada pela escavação vizinha (Figura 193). Os valores dos deslocamentos na direção secundária (valores positivos) aumentaram após o término da obra e início do grampeamento do talude vizinho. Uma parcela deste aumento está, possivelmente, associada ao desconfinamento lateral provocado pela escavação vizinha. Terminada a escavação do “Museu 2” (em 22/03/2005), observa-se uma nítida tendência de estabilização das leituras na direção secundária.

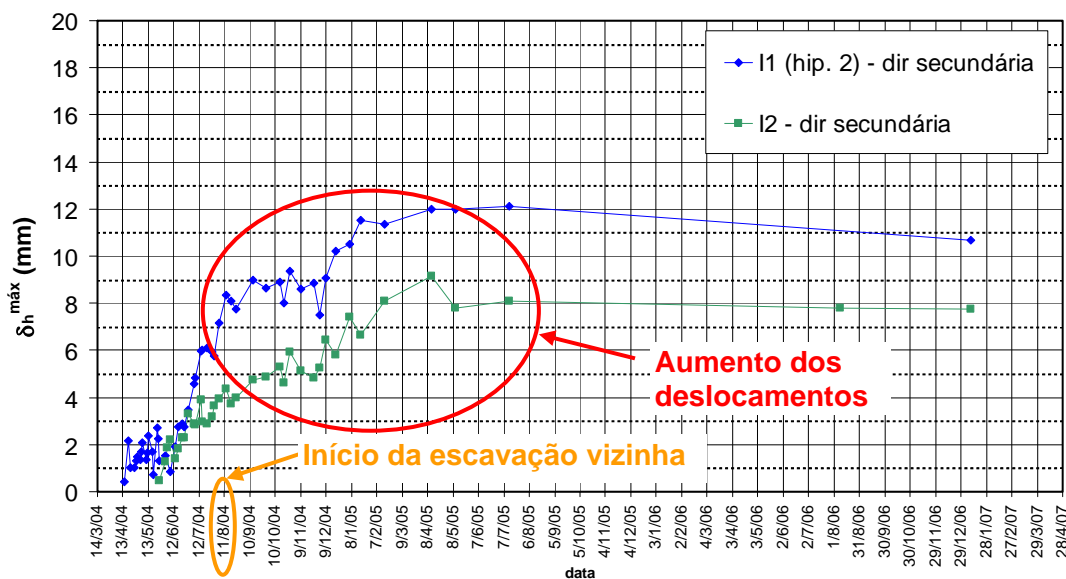


Figura 193. Deslocamentos horizontais na direção secundária devidos às escavações do “Museu 2”.

Conforme discutido no item 6.2.1, o vetor resultante dos deslocamentos horizontais do talude tende a seguir a direção NW-SE, segundo a orientação apresentada na Figura 133.

Os valores da força de tração máxima para cada linha de grampos instrumentados são ilustrados na Figura 194.

Os resultados indicaram uma variação da força de tração máxima com o início da escavação vizinha. O desconfinamento lateral promove um aumento da mobilização dos grampos inferiores. Os reforços mais mobilizados durante a escavação vizinha, foram os grampos C67 / C69 e os grampos da face G. Com o avanço do grampeamento do “Museu 2” e acomodação do talude grampeado, observa-se o desenvolvimento de esforços axiais máximos apenas nos grampos G07 / G09 e G54 / G56. Com o término da escavação, nota-se uma nítida tendência de estabilização dos esforços axiais máximos nos grampos.

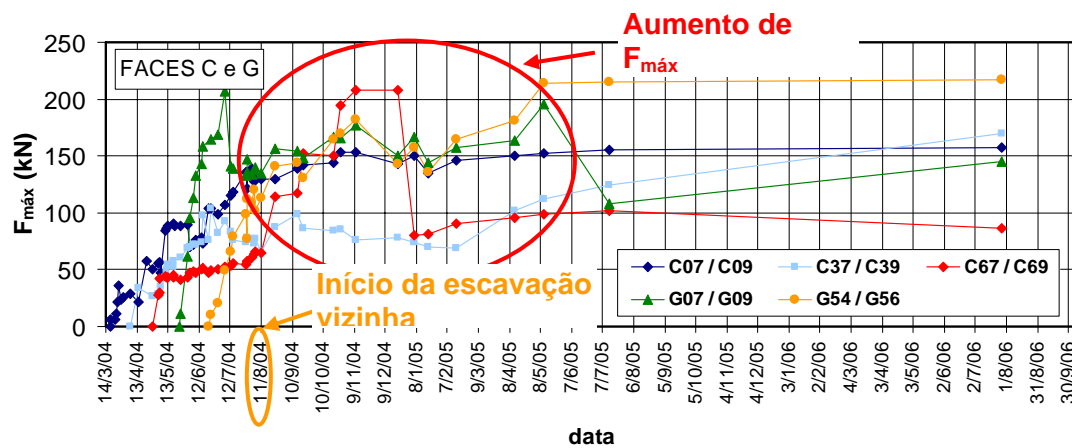


Figura 194. Variação da força axial máxima nos grampos instrumentados devidas às escavações do “Museu 2”.