6 Instrumentação e Monitoramento

As escavações da encosta foram acompanhadas, desde a fase inicial, por um programa de instrumentação geotécnica destinada à verificação de deslocamentos horizontais, em superfície e em profundidade, e de cargas em alguns dos grampos de reforço dos trechos de taludes revestidos com concreto projetado. A instrumentação utilizada no estudo conta com três tipos de dispositivos distintos:

- Extensômetros (strain gages) nas barras dos grampos;
- Tell-tales;
- Inclinômetros.

Foi selecionada uma região da encosta para a instalação dos grampos instrumentados com extensômetros e *tell-tales*. A região está apresentada na Figura 118. Nesta região diversas ações foram realizadas com o objetivo de estudar o comportamento da encosta:

- Extração de blocos de solo para realização de ensaios de laboratório (capítulo 04);
- Realização de ensaios de arrancamento para determinação dos parâmetros q_s e k_β (Capítulo 05);
- Instalação da instrumentação.

Para algumas cotas específicas foram retirados blocos, realizados ensaios de arrancamento e instalados grampos permanentes com instrumentação para monitoramento. Além disso, os dados referentes à inclinometria para estas cotas foram considerados na pesquisa. A Figura 119 e a Figura 120 mostram uma seção da encosta com a localização dos elementos de investigação e monitoramento descritos. A Tabela 27 resume os elementos presentes em cada um dos quatro taludes da obra.

Além dos instrumentos aqui apresentados, a obra contava com três inclinômetros instalados. Para a análise da região selecionada foram utilizados dois desses inclinômetros: I-01 e I-03.

As leituras de monitoramento foram realizadas à medida que a encosta foi escavada. O intervalo entre as leituras foi programado de acordo com o avanço das escavações.



Figura 118 - Localização da região de instrumentação.



Figura 119 - Localização dos dispositivos de investigação geotécnica (taludes 01 e 02).



Figura 120 - Localização dos dispositivos de investigação geotécnica (taludes 03 e 04).

Tabela 27 - Resumo	dos elementos o	de investigação e	monitoramento na obra	а.
		ao ma oongayao o		~··

Elemento	Talude 01	Talude 02	Talude 03	Talude 04	Total
Grampos Instrumentados	02 (b4a e b4b)	02 (b5a e b5b)	04 (b10a, b10b, b13a e b13b)	02 (b15a e b15b)	10
Ensaios de Arrancamento	02 (AR00)	02 (AR01)	04 (AR02 e AR 03)	02 (AR04)	10
Extração de Blocos Indeformados	02 (BM01 e BM02)	02 (BM03 e BM 04)	04 (BM05, BM06, BM07 e BM08)	02 (BM09 e BM10)	10
<i>Tell Tale</i> (Caixa)	01 (Cx01)	01(Cx02)	02 (Cx03 e Cx 04)	01 (Cx05)	5

6.1.Instrumentos Instalados

A instrumentação do Museu II teve o objetivo de controlar os deslocamentos horizontais do maciço através dos inclinômetros e *tell tales* e as deformações e cargas desenvolvidas nos grampos instrumentados através dos extensômetros colados nas barras.

Para o melhor entendimento dos dados de instrumentação é necessário que sejam definidos os períodos importantes ao longo da escavação da encosta (Tabela 28).

Alguns momentos da obra merecem especial atenção. A primeira paralisação das obras ocorreu no dia 18 de outubro de 2004. Foram registradas cargas elevadas em alguns grampos instrumentados. A causa deste fato foi atribuída a uma grande velocidade da escavação a qual pode ter gerado um grande desconfinamento no material, elevando as cargas no grampo. Naquele momento, os instrumentos destinados à medição de deslocamentos (inclinômetros e *tell tales*) não estavam operando. Dessa forma, optou-se pela paralisação da escavação até a redução das cargas nos grampos, além da modificação da técnica de escavação.

A escolha foi por uma escavação em nichos. Com esse tipo de escavação, o efeito do desconfinamento dos materiais seria minimizado (Figura 121). Após esta modificação não foram registradas novas ocorrências de aumento súbito de cargas nos grampos instrumentados.

Após os términos dos serviços de escavação e grampeamento dos taludes, um dos inclinômetros acusou deslocamentos importantes no talude. Dessa forma, foram programadas novas leituras para os instrumentos instalados. Os resultados estão apresentados na seqüência.

Talude	Datas	Cota de Esc. (m)	Observação
Superior	13/8/04	46,0	Início da Obra (Escavação)
Talude 01	10/10/04	37,8	Extração: BM01 e BM02
	11/10/04	37,8	Instalação: b4a, b4b e Cx01
	14/10/04	36,8	AR00
	18/10/04	36,0	Obra Parada
	25/10/04	35,0	Escavação em Nichos
Talude 02	28/10/04	33,0	Extração: BM03 e BM04
	29/10/04	33,0	Instalação: b5a, b5b e Cx02
	1/11/04	32,0	AR01
	10/11/04	28,0	Obra Parada
Talude 03	13/12/04	26,0	Instalação: b10a e b10b Extração: BM05 e BM06
	14/12/04	26,0	Instalação: Cx03
	16/12/04	25,0	AR02
	9/1/05	20,0	Extração: BM07 e BM08
	10/1/05	20,0	Instalação: b13a, b13b e Cx04
	13/1/05	20,0	AR03
Talude 04	24/1/05	18,0	Extração: BM09 e BM10
	25/1/05	18,0	Instalação: b15a e b15b
	28/1/05	16,5	AR04
	31/1/05	16,0	Instalação: Cx05
	22/3/05	10,9	Fim da Obra
	13/7/05	10,9	Movimentação da encosta
Pós-Obra	5/3/2007	10,9	Final de Leituras de Instrumentos

Tabela 28 - Datas importantes da investigação e monitoramento da obra.



Figura 121 - Vista superior do talude com escavação em nichos

6.2.Inclinômetros

O inclinômetro é um instrumento que serve para medir deslocamentos horizontais dentro do terreno. A seqüência de leituras no tempo permite determinar a progressão dos movimentos do talude e localizar a profundidade de uma eventual superfície de ruptura. A utilização de inclinômetros é prática bastante conhecida em obras geotécnicas. Os procedimentos de instalação são apresentados em detalhes na literatura (Dunnicliff e Green, 1988; Ortigão e Sayão, 2004).

É importante ressaltar que o fundo do furo com o tubo de acesso atingiu uma profundidade que garantiu a ancoragem do tubo, imune aos efeitos da escavação do talude. O furo foi executado com 100 mm de diâmetro, permitindo a inserção do tubo de acesso (80 mm) e o posterior preenchimento com calda de cimento-bentonita (1:10). Durante a instalação, o tubo foi orientado de forma que as ranhuras concordassem com as direções principais da obra (Nunes et al., 2006).

O torpedo padrão de 25 mm de diâmetro é do tipo deslizante e percorre o tubo de baixo para cima. O sensor é guiado por pequenas rodas que garantem o alinhamento do instrumento no centro do tubo (Figura 122). Os deslocamentos são calculados através da equação:

$$\delta_{\rm h} = L \sum \sin \theta$$

Equação 10

onde: δ_h = deslocamento horizontal; L = distância entre medidas; θ = leitura do inclinômetro.



Figura 122 - Inserção do inclinômetro para monitoramento dos deslocamentos horizontais (Nunes et al., 2006)

Os inclinômetros são equipamentos robustos e raramente sofrem perturbações do meio no qual são inseridos. Entretanto, alguns cuidados foram tomados para evitar o vandalismo dos tubos de acesso: (i) colocação de tampa na extremidade do tubo de acesso; (ii) construção de uma caixa de proteção chaveada no entorno do tubo (Figura 123) e (iii) atenção na execução das perfurações subhorizontais dos grampos para evitar os danos nos tubos verticais dos inclinômetros.



Figura 123 - Caixa de proteção e tampa do tubo de acesso do inclinômetro (Nunes et al., 2006)

Foram instalados 03 inclinômetros para acompanhar as deformações horizontais em profundidade durante a execução da escavação. Os inclinômetros situaram-se no alto da encosta, nas proximidades da confluência das paredes direita e do fundo da escavação no Morro do Palácio. A Figura 124 mostra, esquematicamente, a locação dos furos e destaca os inclinômetros que foram utilizados nesta pesquisa.

Os tubos dos inclinômetros foram instalados no interior de perfurações previamente abertas, com diâmetro de aproximadamente 6" (150mm). Concluída a perfuração e a pré-montagem dos tubos (fixação de luvas e alinhamento das ranhuras), estes foram inseridos cuidadosamente no furo, garantindo a continuidade das ranhuras, a verticalidade do tubo e, principalmente, o alinhamento de uma das ranhuras com a maior declividade da encosta, ou a direção de maior movimento esperado. Esta direção é designada de direção "A". A direção defasada de 90 ° com a direção "A" é dita direção "B". A profundidade de cada perfuração foi determinada previamente de modo que a base do inclinômetro atingisse um ponto fixo, livre de deformações ocasionadas pela escavação. Por problemas de fechamento do furo durante a execução, as perfurações para instalação dos inclinômetros I-01 e I-03 foram paralisadas abaixo da elevação programada. Os trechos entre a base da perfuração e a base do tubo dos inclinômetros foram preenchidos com mistura de água-cimento-bentonita.



Figura 124 - Localização dos Inclinômetros na Encosta do Museu II.

Após a inserção do tubo do inclinômetro até a base da perfuração, ou do trecho de preenchimento no fundo, a região anelar entre o furo e o tubo também foi preenchida com a mistura água-cimento-bentonita.

A instalação dos três inclinômetros foi realizada no período de 23/11/2004 a 07/12/2004, quando a escavação/contenção das paredes encontrava-se na banqueta de elevação 29m. A Tabela 29 resume os dados referentes à instalação dos inclinômetros.

As leituras do inclinômetros 01 foram realizadas de dezembro/2004 até dezembro/2006. As medidas de deslocamentos foram tomadas em nas direções

(A e B), conforme representado na Figura 125. A Figura 126 e na Figura 127 apresentam os resultados do inclinômetro I-01 referentes à direção A e B, respectivamente.

Informações	I-01	I-02	I-03
Data Instalação	01/12/04	01/12/04	03/12/04
Data Leitura Inicial	13/12/04	13/12/04	07/12/04
Coordenada Norte	561.733	557.823	554.317
Coordenada Este	272.986	250.371	283.692
Azimute (Eixo A)	186	152	207
Elevação do Topo do Tubo (m) (A)	48,06	53,26	44,33
Elevação da Superfície do Terreno (m) (B)	47,44	52,77	43,96
Elevação da Base do Tubo (m) (C)	3,56	7,76	2,33
Comprimento do Tubo (m) (H)	44,50	45,50	42,00
Trecho do Tubo Acima da Superfície (m) (h)	0,62	0,50	0,37
Altura entre as Bases do Tubo e da Perfuração (b)	1,12	0,50	3,37
Coordenada Norte Coordenada Este Azimute (Eixo A) Elevação do Topo do Tubo (m) (A) Elevação da Superfície do Terreno (m) (B) Elevação da Base do Tubo (m) (C) Comprimento do Tubo (m) (H) Trecho do Tubo Acima da Superfície (m) (h) Altura entre as Bases do Tubo e da Perfuração (b)	561.733 272.986 186 48,06 47,44 3,56 44,50 0,62 1,12	557.823 250.371 152 53,26 52,77 7,76 45,50 0,50 0,50	554.3 283. 20 44, 43, 2,3 42, 0,3 3,3

Tabela 29 - Dados referentes à instalação dos inclinômetros

Geoprojetos (2005) relata que conforme informado à proprietária do empreendimento em 19/04/2005, os inclinômetros I-01 e I-03 foram vandalizados e danificados, impedindo a leitura sistemática desses dois instrumentos. A empresa construtora conseguiu recuperar o inclinômetro I-03, passando a ser lido normalmente a partir da segunda quinzena do mês de maio de 2005. Quanto ao inclinômetro I-01, após algumas tentativas de recuperá-lo, só foi possível desobstruí-lo até a profundidade de 27m. No dia 07/06/2005 foi realizada uma nova leitura "zero" desse instrumento, até a profundidade 26,5m, passando-se, a partir dessa data, a denominá-lo como inclinômetro I-01A, adicionando-as às da última leitura efetuada.

A análise dos dados referentes ao inclinômetro I-01 levou em consideração esta nova referência. Na Figura 126 é possível notar que uma das leituras do inclinômetro é bastante diferente das outras.





RUA LATERAL

CRISTA DO TALUDE

Figura 125 - Referencial adotado para as leituras inclinométricas



Figura 126 – Deslocamentos horizontais registrados pelo Inclinômetro I-01 - Direção A (Geoprojetos, 2007).



Figura 127 – Deslocamentos horizontais registrados pelo Inclinômetro I-01 - Direção B (Geoprojetos, 2007).

Os dados referentes ao inclinômetro I-03 também foram utilizados nas análises. A Figura 128 e Figura 129 apresentam os resultados obtidos para as direções A e B, respectivamente.



Figura 128 - Deslocamentos horizontais registrados pelo Inclinômetro I-03 - Direção A (Geoprojetos, 2007).



Figura 129 - Deslocamentos horizontais registrados pelo Inclinômetro I-03 - Direção B (Geoprojetos, 2007).

A análise dos relatórios de inclinometria permitiu a obtenção de uma linha de deslocamentos para o talude. Esta linha está associada a cota onde os inclinômetros iniciam a movimentação em relação a linha de instalação (Figura 130).



Figura 130 - Determinação da linha de deslocamentos com base nas informações dos inclinômetros

Com o objetivo de comparar as leituras inclinométricas com os outros elementos de instrumentação da obra foram extraídos os dados referentes ao deslocamento nas profundidades correspondentes a outros instrumentos (Tabela 30). A evolução destes deslocamentos será comparara com os dados fornecidos pelos alongâmetros.

Cota (m)		40,0	34,0	28,0	21,0	17,0
Profundidade (m)	I-01	7,4	13,4	19,4	26,4	30,4
	I-03	4,0	10,0	16,0	23,0	27,0
Tell Tales		Cx01	Cx02	Cx03	Cx04	Cx05

Tabela 30 - Cotas de interesse para os inclinômetros

A Figura 131 resume a evolução dos deslocamentos horizontais para as cotas 17, 21, 28, 34 e 40m. São também indicados os períodos correspondentes às fases de escavação e de monitoramento. Vale ressaltar que o monitoramento das fases de implantação da obra foi realizada até janeiro de 2007. Nota-se que os deslocamentos são maiores no período de escavação, fato coerente com a natureza dos serviços. Existe uma tendência de estabilização dos deslocamentos após o final da escavação.

No entanto para algumas cotas, especialmente a 40,0m na direção principal, é possível verificar um aumento dos deslocamentos mesmo após o término das escavações. Este fato foi identificado pelas movimentações nos inclinômetros e está destacado na Figura 131.



Figura 131 - Evolução dos deslocamentos horizontais para as cotas 17, 21, 28, 34 e 40m - I-01

O mesmo tratamento de dados foi realizado para o inclinômetro I-03. A Figura 132 mostra a evolução dos deslocamentos horizontais e a divisão do período total em escavação e monitoramento.

Diferente do que foi observado no I-01, não foi possível notar uma estabilização dos deslocamentos imediatamente após o período de escavação. Os deslocamentos aumentaram e depois diminuíram, configurando um período oscilatório de medições. No entanto, após o dia 24/03/06 essa tendência se inverteu e são observados grandes deslocamentos horizontais para as cotas analisadas. Este comportamento não está de acordo com o esperado e será analisado posteriormente em conjunto com os outros instrumentos disponíveis na encosta.

Gomes Silva (2006) mostrou que existe um plano de falhas em uma direção perpendicular ao deslocamento registrados pelo I-03 (Figura 133). A movimentação deste plano de falhas é uma provável explicação para este comportamento anômalo. Os dados aqui obtidos serão comparados com dados de outros instrumentos.



Figura 132 – Evolução dos deslocamentos horizontais para as cotas 17, 21, 28, 34 e 40m - I-03



Figura 133 - Localização do plano de falhas em relação ao deslocamento observado pelo Inclinômetro 03 (Google Earth, 2007).

6.2.1. Tell Tales

Tell tales são dispositivos que medem os deslocamentos horizontais de pontos diversos ao longo da cota na qual são instalados. Trata-se de um fio tencionado, fixo na extremidade interna correspondente ao ponto de medida e livre na extremidade externa localizada na face dos taludes (Nunes et al, 2006).

Neste trabalho, foram utilizados dispositivos simples e de baixo custo. O fio de aço tem resistência à tração de 10kgf (comumente utilizado para pesca), com recobrimento de poliéster para proteção anticorrosiva. O bom desempenho e a trabalhabilidade deste tipo de *tell tale* foram indicados pelos resultados no campo (Becker e Nunes, 2002) e no laboratório (Aguiar et al, 2004).

Os tell tales foram instalados em furos de mesmo diâmetro dos furos dos grampos. O comprimento do furo ultrapassou a posição das superfícies potenciais de ruptura do talude, indicadas nas análises de equilíbrio limite. A Figura 134 apresenta o esquema de um conjunto de 3 *tell tales* instalados em um único furo de 100mm de diâmetro, com comprimentos variados e garantidos pelas ancoragens das extremidades. Observa-se que o furo foi completamente preenchido com calda de cimento para fixação dos tubos de PVC. A calda possuía um fator água/cimento de 0,5, igual à empregada para execução dos grampos. Ressalta-se que os fios de aço permanecem livres no interior dos tubos.



Figura 134 - Esquema do conjunto de três *tell tales* de comprimentos diversos em um único furo (Nunes et al, 2006).

A medição baseia-se no deslocamento de um corpo rígido. Para cada deslocamento que ocorrer no interior da massa de solo, haverá uma deflexão correspondente a ser lida na escala de medição situada na face do talude.

O detalhe da fixação do fio em barra de aço e a sua ancoragem no furo são indicados na Figura 135a. A barra é inserida na extremidade do tubo de PVC, responsável pela minimização do atrito e proteção do fio de pesca. O tubo de PVC de diâmetro nominal de 12,7mm (1/2") tem o mesmo comprimento do fio de pesca e sua extremidade atinge a face do talude. A Figura 135b indica o posicionamento dos 3 tubos com os fios na saída do furo. Nas extremidades externas dos fios foram acoplados pesos metálicos de 0,5 a 1,0 kgf com a função de garantir a tensão dos fios de *tell tales* (Figura 135c).



Figura 135 – Esquema de 3 *tell tales* em furo: (a) Extremidade fixa de 1 fio; (b) Seção transversal dos fios ao longo e na saída do furo; (c) Vistas lateral e frontal da extremidade livre dos fios (Nunes et al, 2006).

É recomendável a construção de uma caixa protetora para as extremidades externas dos *tell tales*. Esta caixa pode servir como anteparo para a escala milimetrada onde são realizadas as medidas. A Figura 136 ilustra o conjunto formado por quatro *tell tales* na caixa de leitura metálica construída neste projeto. Observa-se a escala em mm no fundo da caixa e as pequenas agulhas indicadoras da progressão dos deslocamentos horizontais. Ressalta-se que as roldanas de encaminhamento dos fios devem ser confeccionadas em material resistente à corrosão e livres de atrito para não restringir o movimento. Um detalhe importante é a fixação das roldanas na haste de suporte, para impedir movimentos laterais que possam perturbar as medições dos *tell tales* vizinhos. Os *tell tales* são medidores mecânicos de baixo custo, robustos, imunes a oscilações elétricas e térmicas e de fácil montagem e operação. Entretanto, apresentam resolução limitada a 0,5mm em função da escala milimétrica utilizada.



Figura 136 - Conjunto de tell tales na caixa metálica (Lima, 2007).

Os *tell-tales* foram posicionados em pontos localizados entre os grampos instrumentados. A posição das cinco caixas de alongâmetros pode ser vista na Figura 137. A Tabela 5 fornece um resumo do projeto de instrumentação por *tell tales*.



Figura 137 - Posicionamento das caixas de tell tale na encosta.

Tabela 31 -	Resumo do	proieto	de instrun	nentacão	dos a	longâmetros

Caixa	Cota (m)	Data da 1ª leitura	Especificação dos	Cota da escavação na
			Tell Tales	data da leitura (m)
Cx01	41,0	10 Novembro 04	TT1 (4,0m), TT2 (10,0m) e TT3 (20,0m)	40,0
Cx02	34,0	12 Novembro 04	TT4 (4,0m), TT5 (10,0m) e TT6 (20,0m)	32,0
Cx03	28,0	16 Fevereiro 05	TT7 (4,0m), TT8 (10,0m) e TT9 (20,0m)	25,0
Cx04	21,0	30 Março 05	TT10 (4,0m), TT11 (10,0m) e TT12 (20.0m)	18,0
Cx05	17,0	25 Abril 05	TT13 (4,0m), TT14 (10,0m) e TT15 (20,0m)	12,0

O principio de funcionamento está baseado no deslocamento de um corpo rígido. Os pontos instrumentados foram posicionados entre os grampos com *strain gages* utilizados para monitoramento (Figura 138).

As leituras eram feitas manualmente (Figura 139). Algumas vezes não foi possível fazer a leitura das caixas devido à dificuldade de acesso provocada pelas operações de escavação da encosta.



Figura 138 - Posicionamento das três primeiras caixas de tell-tales



Figura 139 - Leituras manuais dos tell-tales

A leitura inicial foi obtida, na maioria dos casos, conjuntamente com a leitura zero dos grampos instrumentados. A Tabela 32 apresenta as leituras de deslocamento realizadas ao longo do monitoramento da obra. O *tell tale* TT7 (Cx 03) não foi medido devido a um problema na instalação do mesmo. A linha que era usada para a leitura das deflexões se rompeu na extremidade da fixação durante o processo de instalação deste instrumento.

As últimas leituras para todos os *tell tales* registram deslocamentos significativos da massa de solo. A caixa onde os *tell tales* estão posicionados está sujeita a movimentações da face do talude. Dessa forma, as leituras obtidas pelos instrumentos devem ser descontadas dos deslocamentos registrados por meio de medições referenciadas. Este fato pode ser corrigido com a utilização de leituras topográficas tomando como referência um marco fixo e a face das caixas de *tell tales*. No entanto, esta correção não foi efetuada durante esta pesquisa.

A Figura 140 apresenta a comparação entre as leituras dos *tell tales* e o avanço da escavação do talude para a cota 40,0m (caixa 01), em função das etapas da obra: escavação e monitoramento.

Caixa		1		2		3		4			5				
Cota (m)		40,00)		34,00)		28,00)		21,00			17,00	
Comprimento (m)	4,0	10,0	20,0	4,0	10,0	20,0	4,0	10,0	20,0	4,0	10,0	20,0	4,0	10,0	20,0
Alongâmetro	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT6	TT7	TT8	TT9	TT10	TT11	TT12	TT13	TT14	TT15
11/10/04	0,0	0,0	0,0												
13/10/04	0,0	0,0	0,0												
14/10/04	0,5	0,0	0,0												
18/10/04	1,0	0,5	1,0												
19/10/04	1,0	0,5	1,0			80									
20/10/04	1,0	0,5	1,0		eta)	o									
21/10/04	1,0	0,5	1,0	10	0112										
22/10/04	1,0	0,5	1,0	4	7										
25/10/04	1,0	0,5	1,0												
26/10/04	1,0	1,0	2,0												
27/10/04	1,0	1,0	2,0						~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~						
29/10/04	1,0	1,0	2,0					stal	0						
01/11/04	1,0	1,0	2,0	TT4	TT5	TT6	5	0112							
04/11/04	1,0	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	40	-				80			
05/11/04	1,5	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0					stalic	7			
08/11/04	1,5	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0					0102				80
10/11/04	1,5	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0				4	¢-			c ale	F
17/11/04	1,5	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0								OWE	
26/11/04	1,5	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0							4	5 °	
29/11/04	1,5	1,5	3,0	0,0	0,0	0,0									
06/12/04	1,5	1,5	3,0	0,0	0,0	0,0									
07/12/04	1,5	1,5	3,0	0,5	0,5	1,0									
09/12/04	1,5	1,5	3,0	0,5	0,5	1,0									
13/12/04	1,5	1,5	3,0	0,5	0,5	1,0									
16/12/04	1,5	1,5	3,0	0,5	0,5	1,0	TT7	TT8	TT9						
21/12/04	1,5	2,0	3,0	0,5	0,5	1,0	-	0,0	0,0						
03/01/05	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	-	0,0	0,0						
07/01/05	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	-	0,0	0,0						
10/01/05	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	-	0,0	0,0						
13/01/05	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	-	0,0	0,0						
18/01/05	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	-	0,0	0,0	TT10	TT11	TT12			
21/01/05	1,5	2,0	3,0	1,0	1,5	2,0	-	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0			
25/01/05	2,5	2,0	3,0	1,5	2,0	2,5	-	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0			
28/01/05	2,5	2,0	3,0	1,5	2,0	2,5	-	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0			
03/02/05	2,5	2,5	3,0	1,5	2,0	2,5	-	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	TT13	TT14	TT15
16/02/05	2,5	2,5	3,0	1,5	2,0	2,5	-	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0
23/02/05	2,5	2,5	3,5	1,5	2,0	2,5	-	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0
03/03/05	2,5	3,0	3,5	1,5	2,0	2,5	-	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0
22/03/05	2,5	3,0	3,5	2,0	2,0	2,5	-	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0
30/03/05	2,5	3,0	3,5	2,0	2,5	3,0	-	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0
14/04/05	2,5	3,0	4,0	2,0	2,5	3,0	-	1,5	2,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0
11/05/05	3,0	3,5	4,0	2,0	2,5	3,0	-	1,5	2,0	1,0	0,5	2,0	1,0	1,5	1,5
13/07/05	3,0	3,5	4,0	2,0	2,5	3,0	-	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	1,5
12/09/05	3,0	3,5	4,0	2,0	2,5	3,0	-	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	1,5
21/11/05	3,0	4,0	4,5	2,0	2,5	3,0	-	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	1,5
05/03/07	4,5	5,0	6,0	3,0	4,0	6,0	-	3,0	3,5	2,0	3,0	5,0	2,0	3,0	5,0

Tabela 32 - Leituras de deslocamentos dos *tell tales* ao longo do período de escavação e monitoramento



Figura 140 - Deslocamentos dos *tell tales* (caixa 01) em função da evolução da escavação para a cota 40m.

Os maiores deslocamentos (4mm) ocorrem no final do período de escavação. Após este período é possível notar uma tendência de estabilização das leituras. No entanto, para as leituras posteriores a dezembro de 2005 existe um novo incremento de deslocamentos. Para o instrumento TT3 os deslocamentos pós-escavação aumentaram de 50% em relação aos observados no período construtivo. No entanto, é necessário destacar que mais de 60% dos deslocamentos totais ocorreram em um curto período de tempo correspondente aos 6 meses iniciais de monitoramento.

Com o objetivo de analisar de forma conjunta os dados disponíveis para o deslocamento da encosta foram comparados aos deslocamentos registrados pelos *tell tales* e pelos inclinômetros para a cota correspondente a 40m (Figura 142). Os dados considerados para os inclinômetros referem-se à direção principal que é coincidente com a direção de deslocamentos do *tell tale*.

O I-01 apresenta a mesma tendência de comportamento que os *tell tales* da caixa 01. Este fato confirma a aplicabilidade e adequação dos *tell tales* como opção para a instrumentação de taludes escavados.

Por outro lado, o I-03 apresentou a mesma tendência de comportamento que os outros instrumentos até o mês de agosto de 2006. Após este momento, os deslocamentos no inclinômetro foram significativos e podem indicar uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310915/CA

movimentação importante na encosta. Lima (2007) relata movimentações na obra adjacente no mesmo período. De acordo com o autor essa movimentações podem ser devidas a escavação realizada ao lado da obra Museu I (Figura 141). Inspeções de campo não conseguiram identificar sinais de deslocamentos dessa magnitude na encosta.



Figura 141 - Localização da obra adjacente a área de estudo (Google Earth, 2007)



Figura 142 - Análise conjunta de deslocamentos de inclinômetros (direção principal) e *tell tales* (Cx 01) Cota 40m.

Os deslocamentos obtidos pelas leituras dos *tell tales* na caixa 02 (cota 34m) também foram analisados em função da etapa da obra e do avanço da escavação (Figura 143). Para este caso os deslocamentos estabilizaram imediatamente após o termino da escavação. Por outro lado, as leituras realizadas após dois anos do término da obra mostram novamente um aumento de 50% durante este período. A magnitude dessas leituras pode ser atribuída ao não controle topográfico da caixa de instrumentação.



Figura 143 - Leituras dos *tell tales* (Cx 02) em função da evolução da escavação Cota 34m.

Os dados obtidos pelos *tell tales* da caixa 02 foram analisados conjuntamente com as leituras dos inclinômetros para a cota 34m (Figura 144). O I-01 comportou-se de forma similar aos *tell tales*. Tal como foi observado para a cota 40m, o I-03 apresentou comportamento bastante similar ao conjunto de instrumentos restantes até o final do ano de 2006. Após esta data, os deslocamentos foram significativos. Não existiam no campo sinais de movimentação de tal magnitude.



Figura 144 - Análise conjunta de deslocamentos de inclinômetros (direção principal) e *tell tales* (Cx 02) Cota 34m

A caixa 03 está localizada na cota 28m e possui apenas dois *tell tales.* A Figura 145 apresenta as leituras obtidas por estes instrumentos. Similarmente ao que foi observado para as caixas anteriores (Cx 01 e Cx 02), nota-se uma tendência de estabilização dos deslocamentos após o período de escavação e maiores deslocamentos ao final das leituras. Destaca-se novamente que não foi executado um controle topográfico do deslocamento da caixa onde estão contidos os *tell tales*.

A análise conjunta dos dados de inclinometria e *tell tales* também foi executada para a cota 28m (Figura 146). O mesmo comportamento observado para os inclinômetros em relação aos *tell tales* foi verificado para a cota 28m.

Existe também uma clara tendência a diminuição dos deslocamentos nominais em função do aprofundamento dos instrumentos. Este aspecto está de acordo com o esperado vista a natureza do perfil de intemperismo do material da encosta.



Figura 145 - Deslocamentos dos *tell tales* (caixa 03) em função da evolução da escavação Cota 28m.



Figura 146 – Análise conjunta de deslocamentos de inclinômetros (direção principal) e *tell tales* (caixa 03) para a cota 28m

A caixa 04 possui 03 *tell tales* e está localizada na cota 21m. A Figura 147 apresenta os resultados obtidos para este conjunto de instrumentos. O comportamento é similar ao observado nos outros instrumentos já analisados.



Figura 147 - Deslocamentos dos tell tales (caixa 04) em função da evolução da escavação Cota 21m.

A análise conjunta dos dados para a cota 21m (Figura 148) mostrou o mesmo comportamento verificado para outras cotas analisadas com exceção do I-01 que não apresentou tendência de aumento de deslocamentos após o término do período de escavação.

A caixa 05 está localizada na cota 17m e possui três *tell tales* instalados para medição de deslocamentos da face do talude. A Figura 149 mostra os resultados obtidos para a caixa 05. Mesmo após o término da escavação os *tell tales* continuaram indicando deslocamentos. A magnitude dos deslocamentos após o término da escavação foi superior em mais do que 100% comparado com o período construtivo.

A análise conjunta dos dados para a cota 17m indicou o mesmo que foi observado para a maioria das outras cotas (Figura 150). O I-01 segue uma tendência de estabilização, enquanto que o I-03 possui deslocamentos de magnitude significativa, os quais não foram verificados em inspeções de campo e que podem ser explicados em função de vandalismo ou de movimentação decorrente da escavação de uma obra adjacente ao Museu I. Lima (2007) também verificou deslocamentos significativos em sua obra no mesmo período e sugere que possa ser devidos a escavação da obra adjacente.



Figura 148 - Análise conjunta de deslocamentos de inclinômetros (direção principal) e *tell tales* (caixa 04) Cota 21m



Figura 149 - Leituras dos tell tales (caixa 05) em função da evolução da escavação Cota 17m.



Figura 150 - Análise conjunta de deslocamentos de inclinômetros (direção principal) e tell tales (caixa 05) Cota 17m

Os valores de deslocamentos apresentados na Figura 151, Figura 152 e Figura 153 representam os deslocamentos totais, acumulados até fevereiro e julho de 2005 e março de 2007, respectivamente. Os valores foram medidos em cada *tell tale* e foram plotados nos pontos fixos correspondentes às extremidades embutidas no interior do maciço. Portanto, eles indicam a distribuição de deslocamentos na parte interna do talude e revelam um aumento dos deslocamentos com o avanço do monitoramento da obra. Mesmo após o término da obra é possível observar um aumento dos deslocamentos especialmente para a caixa de *tell tales* localizada na parte superior (caixa 01).



Figura 151 - Deslocamentos indicados pelos *tell tales* em função de sua localização no interior do talude para o dia 23/02/05.

Mesmo levando-se em conta as limitações relativas ao tipo de leitura fornecida pelo *tell tale* é possível monitorar os deslocamentos de um talude durante a sua fase construtiva e de funcionamento. A interpretação dos resultados dos *tell tales* contribui para a aferição do estado de segurança da obra. Durante o processo de escavação é possível monitorar a evolução dos deslocamentos e tomar medidas de mitigação de possíveis comportamentos inesperados. Dentre as medidas mitigadoras pode-se destacar o aumento de densidade de grampos, opção por escavação de nichos e redução da altura de escavação. A inclinometria também é capaz de fornecer as mesmas informações, no entanto a instalação de *tell tale* constitui em alternativa mais simples e de menor custo.

Analisando-se a variação de leituras de todos os *tell tales* constatou-se que os maiores deslocamentos foram verificados na proximidade da face do talude, isto é, região localizada de 4 a 10m da face do talude. A interpretação desses resultados possibilita delimitar uma região de maior movimentação do maciço, em função dos dados obtidos por meio dos *tell tales* (Figura 154).



Figura 152 - Deslocamentos indicados pelos *tell tales* em função de sua localização no interior do talude para o dia 13/07/05.



Figura 153 - Deslocamentos indicados pelos Tell Tales em função de sua localização no interior do talude para o dia 05/03/07.



Figura 154 - Localização da região de maiores deslocamentos indicados pelos tell tales.

Comparando-se as regiões de maiores deslocamentos obtidas por meio de inclinômetros e *tell tales* é possível notar que as regiões são independentes. A região obtida pelos inclinômetros localiza-se atrás dos grampos (Figura 155). É possível concluir que os instrumentos determinam superfícies potenciais de deslizamento independentes. A região obtida pelos inclinômetros sugere uma superfície global, enquanto que para os *tell tales* a superfície é local.



Figura 155 - Localização das regiões de maiores deslocamentos indicados pelos *tell tales* e inclinômetros.

6.2.2. Strain Gages (Extensômetros Elétricos)

O objetivo do programa de monitoramento e instrumentação geotécnica do talude foi o de buscar o entendimento do comportamento de obras em solo grampeado (Sayão et al., 2005).

O programa englobou a avaliação das cargas nos grampos, ao longo da massa de solo reforçada, a partir das leituras de extensômetros elétricos ("*strain-gages*").

As barras de aço que constituem os grampos podem ser instrumentadas com extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*). O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que relaciona pequenas variações de dimensão com variações equivalentes em sua resistência elétrica. O princípio de funcionamento baseia-se no aumento ou redução da resistência de um condutor quando submetido a forças de tração ou de compressão.

A maior vantagem de emprego deste tipo de transdutor reside no menor custo quando comparado aos outros dispositivos de medida, tais como os

223

transdutores de deformação de corda vibrante e LVDTs. São capazes de fornecer medidas com 10⁻⁶ mm/mm de resolução. Entretanto, os *strain gages* exigem cuidados especiais quanto à colagem, conexão elétrica, proteção térmica, elétrica e mecânica.

Nesta pesquisa é analisado o comportamento tensão-deformação de grampos instalados na encosta. Além disso, buscou-se conhecer a distribuição de esforços e deformações em um grampo durante o ensaio de arrancamento. O monitoramento das deformações registradas por extensômetros elétricos, distribuídos ao longo da barra de aço dos grampos instrumentados, fornece subsídios importantes para a análise dos mecanismos de distribuição de carga e de deformação dos grampos.

A escolha de extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) para a instrumentação das barras deveu-se a diversos fatores, tais como alta precisão da medida, baixo custo, excelente linearidade e relativa facilidade de instalação.

A maioria dos fabricantes oferece a opção de *strain gages* para aço com resistência de 120 ou 350 Ohms. Estes são mais sensíveis, porém de maior custo que os primeiros. Ambos devem ser alimentados por uma fonte estável. Neste trabalho, optou-se por *strain gages* de 120 Ohms, com fator de medida (*gage factor*) de 2,0, fabricados no Brasil (Nunes et al., 2006).

Foram instrumentadas 15 barras ao todo, sendo que 10 para o monitoramento da escavação e 5 para os ensaios de arrancamento (Capítulo 05). A distribuição dos extensômetros ao longo das barras foi projetada de tal modo a permitir medidas de carga espaçadas uniformemente ao longo da barra. Não houve instrumentação no primeiro metro de todos os grampos para evitar a influência das cargas na face de concreto. O projeto de distribuição de extensômetros para as barras está apresentado na Figura 156 e na Figura 157.

Para a realização desta pesquisa, foram instrumentadas 18 barras comerciais de aço (6m de comprimento). Duas para os grampos de 4m, duas para os de 5m, quatro para os de 10m, quatro para os de 13m e seis para os grampos de 15m. Quando necessário foram usadas luvas para unir as barras adjacentes. Foram utilizadas barras INCO-13-D, com diâmetro nominal de 22 mm e tensão de escoamento de 750MPa (aço CA75). As barras possuíam 6m de comprimento e rosca ao longo de todo o seu comprimento. A distribuição de extensômetros está descrita na Tabela 33. O *strain gage* denominado de SG0 é o mais interno, isto é, o que está inserido na extremidade oposta a face do talude.



Figura 156 - Distribuição de Extensômetros nas barras de 4, 5 e 10m.



Figura 157 - Distribuição de Extensômetros nas barras de 13 e 15m

A fase de instrumentação foi finalizada com a calibração das barras. A calibração consiste no carregamento da barra instrumentada, inserida no interior de um tubo de parede espessa que reage à carga aplicada.

Uma vez que a barra de aço instrumentada não sofre atrito com a superfície do tubo, a carga aplicada pelo macaco em uma das extremidades externas da barra será uniformemente transmitida à extremidade ancorada na outra ponta do tubo. Desta forma, mede-se a variação de resistência do extensômetro colado na barra em função da carga aplicada, obtendo-se as curvas de calibração a serem utilizadas para os grampos instrumentados.

Portanto, a partir da variação de voltagem é possível determinar a carga a qual a barra está submetida, seja durante o monitoramento da obra ou durante os ensaios de arrancamento. Um terço das barras foram calibradas e os resultados das mesmas são utilizados para avaliar o comportamento das demais (Proto Silva, 2005 e Springer, 2006).

A Figura 158 ilustra o posicionamento dos grampos instrumentados. Foram selecionados 10 grampos definitivos da obra para a instrumentação. Com o objetivo de comparar o comportamento de grampos similares, para cada um dos grampos selecionados, existe um grampo gêmeo adjacente com as mesmas características geométricas. A Tabela 34 apresenta as principais características dos grampos instrumentados.
Tipo de Barra	Nº de Barras	Comprimento da Barra (m)	Nº de extensômetros
Monitoramento	02	4	6
Monitoramento	02	5	6
Monitoramento	02	10	10
Monitoramento	02	13	12
Monitoramento	02	15	14
TOTAL	10	TOTAL DE EXTENSÔMETROS	48

Tabela 33 - Utilização de barras e extensômetros para monitoramento de escavação

Tabela 34 - Classificação das barras instrumentadas

Barra	Cota (m)	Comprimento da Barra (m)	Nº de extensômetros
b4a	41	4	3
b4b	41	4	3
b5a	34	5	3
b5b	34	5	3
b10a	28	10	5
b10b	28	10	5
b13a	21	13	6
b13b	21	13	6
b15a	17	15	7
b15b	17	15	7

A instalação dos *strain gages* nos grampos foi efetuada em diferentes etapas, tais como a marcação de eixo na barra, preparação de superfície, colagem de *strain gage* e terminal, cabeamento, soldagem e proteção do sistema de medida. Maiores detalhes referentes à instrumentação das barras podem ser obtidos em Springer (2006) e Nunes et al (2006).

Os procedimentos para fixação dos *strain gages* na barra de aço exigem a preparação prévia da região onde serão colados. Trata-se de uma barra nervurada CA75 de diâmetro nominal externo de 22mm e efetivo de 20mm. As nervuras de 2mm de altura foram eliminadas na região de colagem através de usinagem. O polimento fino foi obtido por politriz manual, variando-se a espessura das lixas. Ressalta-se que é inevitável uma pequena redução do diâmetro da barra para cerca de 19mm (Nunes et al., 2006).



Figura 158 - Posição dos grampos instrumentados na face de escavação.

Os strain gages e terminais foram colados com resina do tipo cianoacrilato. As conexões às pontes de Wheatstone foram realizadas através da ligação de 3 fios, a fim de se eliminar o efeito do comprimento do cabo no desbalanceamento da ponte (Figura 159). Todas as ligações são em ponte completa, realizadas em uma caixa externa com os circuitos elétricos correspondentes a cada *strain gage* da barra (Nunes e Castilhos, 2002; Nunes et al., 2002). Após a conexão dos terminais, o conjunto foi protegido com a aplicação de camadas sucessivas de verniz isolante, película de adesivo epóxi Araldite de cura rápida e resina Quilosa Sintex. Estes procedimentos são fundamentais para garantir a minimização de perdas dos *strain gages*, provocadas por falta de isolamento elétrico, umidade e corrosão do circuito elétrico e choques mecânicos resultantes do transporte e instalação das barras (Nunes et al., 2006).



Figura 159 - Colagem e ligação do *strain gage* e circuito externo de ponte de *Wheatstone* (Nunes et al., 2006)

Os strain gages foram conectados em ponte completa de *Wheatstone* utilizando-se cabos de rede independentes para cada segmento de barra de aço de 4 e 6m. Este detalhe foi importante para facilitar o transporte e a instalação dos grampos no campo. Os danos destas operações podem inutilizar toda a instrumentação da barra. Outro detalhe essencial residiu no emprego de cabos blindados. Apesar de mais onerosos, os cabos com blindagem reduzem os efeitos parasitas nas leituras de deformação realizadas no canteiro de obras com geradores e outros equipamentos elétricos em funcionamento. O transporte e a instalação das barras instrumentadas nos furos do talude são operações de risco para *strain gages* e cabos. A flexão das barras pode danificar os *strain gages* ou provocar o fissuramento da proteção com resina, permitindo o contacto de água ou umidade com os circuitos elétricos. Este risco foi reduzido com berços de madeira para acomodação das barras para transporte e instalação. O uso de espaçadores plásticos também é vital para que a barra com *strain gages* e cabos não sofra atrito com a face interna do furo no momento da inserção.

6.2.2.1.Leitura dos Strain gages

A ponte de Wheatstone é o circuito usado para determinar a mudança de resistência de um *strain gage* quando a superfície na qual ele está colado é deformada. Para isto, aplica-se uma voltagem constante de entrada e mede-se a voltagem na saída da ponte. Dentre as vantagens associadas ao uso deste circuito, destacam-se as seguintes (Perry e Lissner, 1962):

(i) A variação da voltagem pode ser diretamente relacionada à deformação;

 (ii) Os sensores podem ser ligados de modo a apresentar compensação elétrica para efeitos indesejáveis como deformações aparentes induzidas por variações térmicas;

(iii) Podem ser realizadas medidas estáticas ou dinâmicas;

(iv) O sistema é simples, robusto e de baixo custo.

A deformação (ε) do *strain gage* é dada pela expressão (Perry e Lissner, 1962 e Daily e Riley, 1991):

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R FS} = \frac{4 \Delta L}{(V + 2 \Delta L) FS}$$

Equação 11

Onde:

ε: Deformação do *strain gage*;

ΔR: Variação de resistência do *strain gage* [ohms];

V: Voltagem de excitação da Ponte de Wheatstone;

R: Resistência nominal do strain gage;

ΔL: Variação de voltagem do *strain gage* da Ponte de *Wheatstone* [volts];

FS: Fator de sensibilidade ou GF (*Gage factor*).

Considerando as características do *strain gage* ($R = 120\Omega e FS = 2,00$) e uma voltagem de excitação adotada igual a 3,0 V, a deformação pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{1500 + \Delta L}$$
 Equação 12

A deformação do *strain gage* pode ser interpretada em termos de força aplicada à barra de aço do grampo, através da teoria da Elasticidade, utilizando uma das seguintes expressões:

 $\sigma = E \epsilon$

Equação 13

ou

 $F = A E \epsilon = R \epsilon$

Equação 14

Onde:

σ: Tensão aplicada na barra de aço [kPa];

F: Força aplicada na barra de aço [kN];

A: Área da seção transversal da barra de aço na região de colagem do strain gage [m²];

- E: Módulo de elasticidade (Young) do aço [kPa];
- R: Constante de correlação (E.A.) [kN];
- ϵ : Deformação do *strain gage* [10⁻⁶].

Conhecidos o módulo de Young do aço e o diâmetro da seção da barra de aço no ponto de colagem do extensômetro elétrico, torna-se possível a conversão dos valores de deformação dos extensômetros elétricos em carga aplicada aos grampos.

A Tabela 35 apresenta as equações que relacionam as forças de tração aplicadas nos grampos com as deformações medidas pelos extensômetros de resistência elétrica para as barras de aço CA50 e CA75, considerando o módulo de Young de 210GPa.

Fabela 35 -	Deformação	dos strain	gages x	carga n	os grampos
	3		0 0	<u> </u>	U 1

Tino de aco	Diâmetro nominal	Diâmetro usinado	Área da seção transversal usinada	$k = \frac{F}{\varepsilon}$
npo de aço	[mm]	[mm]	[m ²]	[kN]
CA50 (GG50 Gerdau)	25	23	4,1546 x 10 ⁻⁴	0,0872kN
CA75 (INCO-13-D)	22	19	2,8352 x 10 ⁻⁴	0,0595kN

6.2.2.2.Calibração dos Strain gages

As barras de aço instrumentadas com *strain gages* foram calibradas através de procedimento especial. As barras eram introduzidas no interior de tubo metálico e fixadas em uma das extremidades. Um macaco hidráulico e célula de carga de 200kN eram acoplados na outra extremidade da barra (Figura 160a). A calibração foi realizada em estágios de carga crescentes de 10kN e as leituras nos *strain gages* foram monitoradas até a estabilização. Utilizou-se o mesmo sistema de aquisição de dados e caixa de pontes de *Wheatstone* disponível para monitoramento dos grampos no campo. A Figura 160b apresenta os resultados típicos da calibração de uma barra instrumentada de 4m de comprimento, em função da carga de tração aplicada e deformações dos *strain gages*, espaçados de 0,50m, a partir do trecho livre (Nunes at al., 2006).

Observa-se que as deformações são calculadas a partir das leituras (em Volts) registradas pelo sistema de aquisição de dados, utilizando a Equação 15. Esta conversão é expressa por (Perry e Lissner, 1962):

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R.GF} = \frac{4.\Delta L}{(V_{exc} + 2.\Delta L)GF}$$
 Equação 15

onde: ε = deformação do *strain gage*; ΔR = variação de resistência do *strain gage*; R = resistência nominal do *strain gage*; GF = *gage factor* do *strain gage*; ΔL = variação de voltagem do *strain gage*; V_{exc} = voltagem de excitação (Ponte de *Wheatstone*).

Pode-se notar que as deformações registradas pelos 5 *strain gages* são semelhantes para cada nível de carregamento aplicado (Figura 160b). As constantes de calibração de cada uma das retas dos *strain gages* diferem entre si de, no máximo, 5,1% (Proto Silva, 2005). Os valores teóricos de deformação calculados podem ser verificados experimentalmente através das deformações da barra em carga, utilizando-se a lei de Hooke:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P/(\pi D^2/4)}{E}$$

onde: ε = deformação do *strain gage*; σ = tensão aplicada à barra; E = módulo de elasticidade da barra de aço; P = carga aplicada; D = diâmetro da barra de aço.





Equação 16

Figura 160 - Calibração e resultados das barras instrumentadas com 5 *strain gages (a) Calibração; (b) Resultados* (Nunes et al., 2006).

Os valores de deformação do strain gage determinados teoricamente e experimentalmente (Tabela 36) foram semelhantes em todos os níveis de carregamento aplicados no ensaio de calibração, indicando, portanto, a qualidade e o bom desempenho das barras instrumentadas.

Tabela 36 - Comparação entre os valores de deformação obtidos teórica e experimentalmente (Nunes et al., 2006)

Carga	Deformação teórica	Deformação experimental
(kN)	(10^{-6})	(10 ⁻⁶)
29,9	415	530
55,4	932	981
81,0	1428	1435
106,4	1790	1886
121,3	2110	2150
142,9	2587	2532

A Figura 161 apresenta um esquema de ligação dos equipamentos de ensaio de arrancamento para aquisição de dados. Os cinco *strain gages* colados à barra de aço a cada 50cm ao longo de seu comprimento, transmitiam sinais de variação de resistência elétrica através do cabo de telefonia (5 pares, sendo 1 par para cada *strain gage*) a uma caixa com pontes completas de Wheatstone, alimentada com três volts.

No sistema de aquisição de dados armazenavam-se os dados de leituras de voltagem da célula de carga e dos extensômetros elétricos colados à barra de aço em função do tempo. Cada estágio de carga no macaco era de cerca de 1MPa ou o correspondente a 8,2kN de força de tração no grampo. Além destes dados, monitoravam-se também as leituras do extensômetro analógico e do manômetro do macaco adaptados ao sistema de arrancamento.



Figura 161 - Esquema de ligação dos equipamentos para aquisição de dados (Springer, 2006)

As barras foram instrumentadas no galpão da SEEL Engenharia e posteriormente transportadas para a obra em Niterói. Durante o transporte foi considerada a possibilidade de flexão excessiva da barra. Para minimizar este risco foi utilizado um sistema de berços de madeira para transporte das barras para o campo. A Figura 162 e a Figura 163 mostram as barras finalizadas e devidamente carregadas para o transporte, respectivamente.



Figura 162 - Barras Instrumentadas sendo preparadas para transporte por caminhão até a obra.



Figura 163 - Barras arrumadas para transporte até a obra

A instalação dos grampos instrumentados na obra foi realizado de forma bastante cuidadosa visando a integridade dos instrumentos e correto posicionamento da barra no interior do furo pré-executado. As barras instrumentadas foram transportadas até a obra em berços de madeira. Após a chegada das mesmas eram posicionados os espaçadores que tinham como objetivo a adequada centralização da barra no furo. Os grampos com comprimento superior a 6m necessitavam da utilização de luvas metálicas para que as barras fossem acopladas antes da colocação da barra no furo. Posteriormente, as barras eram posicionadas de tal modo que pudessem ser montadas por meio de luvas metálicas.

Após a inserção das barras no furo era executada a injeção de nata de cimento no furo. O bom funcionamento dos *strain gages* era verificado com uma leitura inicial que tinha como objetivo verificar a integridade do sistema de instrumentação.

6.3. Cargas nos grampos durante a escavação e serviço

Foram instrumentados 10 grampos para monitoramento da obra. O objetivo do monitoramento das cargas nos grampos é verificar a evolução das cargas em função do avanço do processo de escavação. Foram instrumentadas duas colunas adjacentes de grampos. As leituras sendo efetuadas com intervalos curtos, logo após a instalação, e maiores à medida que a escavação da encosta avançava. A Tabela 37 resume as informações relativas às primeiras leituras de cada par de grampos instrumentados, além de fornecer as cotas de instalação dos grampos e cotas iniciais da escavação correspondentes à primeira leitura.

Ressalta-se que a cota final da escavação atingiu 10,87m e as últimas leituras foram realizadas em março de 2007, totalizando um período de 18 meses de monitoramento. O sistema de aquisição de dados utilizados foi o mesmo da calibração e ensaios de arrancamento (Figura 164).

A programação do monitoramento buscou contemplar várias fases de escavação da obra. Procurou-se fazer uma leitura para cada um dos estágios de escavação da encosta. Além disso, as cargas dos grampos foram medidas em períodos de chuvas e eventos particulares na obra.

Grampo	Cota	Primeira	Última	Cota
	Instalação (m)	Medição	Medição	Inicial (m)
b4a – 35B	41	11/10/04	05/03/07	37,80
b4b – 35C	41	11/10/04	05/03/07	37,80
b5a – 47	34	29/10/04	05/03/07	33,00
b5b – 48	34	29/10/04	05/03/07	33,00
b10a – 51	28	13/12/04	05/03/07	26,00
b10b – 52	28	13/12/04	05/03/07	26,00
b13a – 235	21	13/01/05	05/03/07	20,00
b13b – 236	21	13/01/05	05/03/07	20,00
b15a – 116	17	28/01/05	05/03/07	16,50
b15b - 117	17	28/01/05	05/03/07	16,50

Tabela 37 - Características dos Grampos Instrumentados (Cotas em metros)



Figura 164 - Sistema de Aquisição de dados

A Tabela 38 apresenta as informações obtidas em campo durante a fase de monitoramento. Estão apresentadas as datas, cotas e condições climáticas do dia. Na coluna de observações estão mostrados todos os eventos importantes da obra. No meio do mês de outubro de 2004 (18/10/04) os inclinômetros da obra e os extensômetros indicaram movimentação de encosta e aumento de carga nos grampos, respectivamente. Tal fato acarretou em uma paralisação da obra de pelo menos 15 dias. As escavações foram retomadas

com a opção de escavar a encosta em nichos. Este tipo de escavação é mais recomendado para minimizar os deslocamentos na encosta. Quando a escavação é feita simplesmente em patamares o descarregamento imposto a encosta é muito maior. Grandes deslocamentos podem gerar conseqüências indesejadas a obra.

As leituras de carga devem ser relativas. A leitura zero é fundamental para a obtenção das cargas. Diversos problemas ocorreram durante a campanha de monitoramento. Alguns desses problemas tornaram fundamental a obtenção de outro referencial, isto é, uma nova leitura zero. A ruptura dos cabos de monitoramento aconteceu no dia 17 de novembro de 2004. Durante os serviços de escavação, o operador da retro-escavadeira não havia sido avisado da existência dos cabos. Esse evento causou uma quebra na periodicidade das leituras. O reparo e manutenção dos cabos foram feitos no próprio campo. Após o reparo dos cabos, uma nova leitura zero foi efetuada.

Outro aspecto importante é a corrosão dos conectores dos cabos de monitoramento. Vale ressaltar que a obra está localizada na Praia de Boa Viagem e a proximidade do mar intensifica a corrosão de metais expostos ou com pouca proteção.

O significativo processo corrosivo ocorrido nos conectores por muitas vezes impediam a obtenção de leituras (Figura 165). Era necessária a manutenção periódica dessas conexões. Algumas vezes a manutenção implicava em soldagem dos terminais e obtenção de nova leitura zero.

Durante e após o período de escavação o monitoramento das cargas nos grampos foi executado por meio da leitura dos *strain gages*. No entanto, alguns desses instrumentos apresentaram falhas em seu funcionamento e foram reparados ou descartados para as leituras subseqüentes.

A Tabela 39 apresenta os *strain gages* e a data na qual os mesmos apresentaram problemas de leitura. A perda de *strain gages* pode ser considerada satisfatória. No final do período de leituras apenas 16 dos 48 extensômetros não forneceram mais leituras, isso confere ao sistema uma eficiência de 33% em termos de perda de instrumentação ao longo de 18 meses de serviço.

Este valor pode ser considerado bom quando comparado com outros trabalhos reportados na literatura. Outro fato que deve ser destacado é que durante o período de implantação da obra de contenção (escavação e grampeamento) todos os *strain gages* funcionaram satisfatoriamente. O período no qual não foram obtidas leituras para algumas barras deveu-se a ruptura do

cabo de sinais. A Figura 166 apresenta a evolução da eficiência dos *strain gages* em função da evolução da obra. É possível notar que grande parte das perdas de instrumentos ocorreu após o termino dos serviços de escavação.

Talude	Leitura nº	Dias	Cota de Esc. (m)	Clima	Solo	Observação
Superior	0	13/8/04	46,0	-	-	Início da Obra (Escavação)
	1	11/10/04	37,8	sol	Seco	Instalação de Grampos de 4m
2	2	13/10/04	36,8	sol	Seco	
	3	14/10/04	36,8	sol	Seco	Arrancamento 01
-	4	18/10/04	36,0	sol	Seco	Obra Parada
0	5	19/10/04	36,0	sol	Seco	Obra Parada
ph	6	20/10/04	36,0	chuva	umido	Obra Parada
Talı	7	21/10/04	36,0	chuva	umido	Obra Parada
	8	22/10/04	36,0	sol	seco	Obra Parada
	9	25/10/04	35,0	sol	seco	Escavação em Nichos
	10	26/10/04	34,5	chuva	umido	-
	11	27/10/04	34,0	nublado	umido	-
	12	29/10/04	33,0	sol	umido	Instalação de Grampos 5m
	13	1/11/04	32,0	sol	seco	Arrancamento 02
	14	4/11/04	32,0	sol	seco	-
	15	5/11/04	31,0	sol	Seco	-
02	16	8/11/04	29,0	chuva	umido	-
e	17	10/11/04	28,0	chuva	umido	Obra Parada
aluc	18	17/11/04	28,0	chuva	umido	Ruptura dos Cabos
T ₆	19	26/11/04	27,5	sol	umido	-
	20	29/11/04	27,5	sol	Seco	-
	21	6/12/04	27,0	sol	umido	-
	22	7/12/04	26,5	sol	Seco	-
	23	9/12/04	26,5	sol	Seco	-
	24	13/12/04	26,0	chuva	Seco	Instalação do Grampo 10m
	25	16/12/04	25,0	chuva	umido	Arrancamento 03
e	26	21/12/04	24,5	sol	umido	-
ö	27	3/1/05	23,5	sol	Seco	-
əpr	28	7/1/05	22,5	chuva	umido	-
alı	29	10/1/05	20,0	sol	Seco	Instalação do Grampo 13m
F	30	13/1/05	20,0	sol	umido	Arrancamento 04
	31	18/1/05	20,0	sol	Seco	-
	32	21/1/05	20,0	sol	umido	-
	33	25/1/05	18,0	sol	Seco	Instalação do Grampo 15m
4	34	28/1/05	16,5	chuva	umido	Arrancamento 05
Ŏ	35	3/2/05	16,5	sol	Seco	-
əpr	36	16/2/05	14,5	sol	seco	-
alı	37	23/2/05	14,0	chuva	umido	-
н	38	3/3/05	13,0	sol	umido	-
	39	22/3/05	10,9	chuva	umido	Fim da Obra
	40	30/3/05	10,9	chuva	umido	-
щ	41	14/4/05	10,9	sol	Seco	-
brá	42	11/5/05	10,9	sol	Seco	-
Q	43	13/7/05	10,9	sol	Seco	movimentação da encosta
òs	44	12/9/05	10,9	sol	seco	-
ш	45	21/11/05	10,9	sol	Seco	-
	46	5/3/07	10,9	sol	Seco	Final de Leituras

Tabela 38 - Diário de Obra Simplificado



Figura 165 - Corrosão dos conectores no cabo de monitoramento

Tabela 39 - Strain Gages que apresentaram problemas durante o monitoramento

Barra	SG	Última Leitura
4b	SG1	21/11/2005
	SG2	12/9/2005
5b	SG1	12/9/2005
	SG2	21/11/2005
10a	SG2	21/11/05
	SG3	12/09/05
10b	SG1	13/7/05
	SG2	21/11/05
	SG3	13/7/05
13a	SG3	13/07/05
	SG4	13/07/05
13b	SG3	21/11/05
	SG4	12/09/05
	SG5	21/11/05
15a	SG3	21/11/05
15b	SG6	05/03/07



Figura 166 - Eficiência do sistema de monitoramento (Número de Strain gages Perdidos/ Número de Strain gages total)

A evolução das cargas ao longo do monitoramento será apresentada nos itens subseqüentes. Para cada uma das barras será apresentada a evolução de cada um dos *strain gages* ao longo da escavação, bem como a distribuição de cargas ao longo dos grampos com o tempo.

6.3.1.Barras de 4m (cota 40,5m)

Os grampos instrumentados de 4m foram denominados de b4a e b4b. Foram instalados no dia 11/10/04 e possuíam seis *strain gages*. Apenas dois *strain gages* não forneceram leituras até o final do período de estudo.

A Figura 167 mostra a evolução das cargas em todos os instrumentos em função dos períodos da obra e do andamento da escavação. É possível afirmar que as maiores cargas ocorreram durante o início das escavações. No dia 18/10/04 foram registrados esforços de grande magnitude no grampo b4a. Esse mesmo padrão refletiu-se para a maioria dos outros instrumentos.

A decisão tomada naquele momento foi a de mudar o método de escavação para execução de nichos de escavação, como comentado anteriormente. Após a escavação em nichos nota-se uma tendência geral de diminuição das cargas até a sua estabilização (Figura 167). Terminado o período de escavação não foram registradas grandes variações de carga. As variações mais significativas de carga ocorreram até a cota de escavação igual a 25m. Isto é, somente após 15m de escavação em relação à cota de instalação dos grampos foram observadas mudanças de carga importantes.

Os strain gages SG0 dos grampos b4a e b4b são os mais internos ao maciço. Apesar dos instrumentos não apresentarem a mesma trajetória de evolução de tensões é possível que as cargas de estabilização para ambos sejam equivalentes. Tal fato não foi observado para os outros pares de *strain gages* SG1 e SG2.

Deve ser destacado que apesar dos grampos serem adjacentes, é possível que os mesmos estejam inseridos em massas de solo com características diferentes como foi apresentado por Gomes da Silva (2006) em seu modelo tridimensional.



Figura 167 - Evolução de cargas nos *strain gages* para as barras de 4m em função do período da obra.

A Figura 168 e a Figura 169 mostram a distribuição de cargas em função do tempo para as barras b4a e b4b, respectivamente.

O grampo b4a apresenta uma distribuição de tensões diferente do que era esperado. Os maiores esforços desenvolveram-se nas proximidades das extremidades do grampo. A pequena transferência de carga para a porção central pode ser explicada devido a ocorrência de um material menos rígido na região central do grampo que promoveu a transferência de carga para as extremidades do grampo. O padrão de leituras observadas no dia 18/10/04 mostrava uma distribuição dentro do esperado, no entanto, a baixa rigidez dessa região deve ter contribuído para a redistribuição de esforços para os outros pontos.

Por outro lado o grampo b4b mostra uma distribuição de esforços semelhante à conclusão de Clouterre (1991). Maiores esforços na região central do grampo e menores na extremidade. É provável que este grampo esteja inserido em uma massa de solo mais homogênea do que a observada para o grampo adjacente.

Os pontos de tração máxima obtidos para os dois grampos serão utilizados posteriormente para a definição das zonas ativas e passivas no interior do talude.



Figura 168 - Distribuição de cargas no período de monitoramento - grampo b4a.



Figura 169 - Distribuição de cargas no período de monitoramento – grampo b4b.

6.3.2.Barras de 5m (34m)

Os grampos instrumentados de 5m foram denominados de b5a e b5b. Foram instalados no dia 29/10/04 e possuíam seis *strain gages*. Apenas dois *strain gages* não forneceram leituras até o final do período de estudo.

A Figura 170 retrata a evolução das cargas nos *strain gages* ao longo do tempo em função do avanço de escavação. Logo após a instalação dos grampos é possível notar uma tendência de aumento de cargas no grampo que se verifica até o momento em que a escavação atinge a cota 20m. Após esta cota existe uma tendência geral de estabilização das cargas. Os *strain gages* análogos estabilizam em cargas equivalentes com exceção dos SG2. Este fato pode ser atribuído a uma diferença de material para os instrumentos citados.

Os altos valores obtidos para o SG1 do grampo b5a logo após a instalação do grampo podem ser atribuídos a um comportamento anômalo do instrumento.

A diminuição de cargas ao longo do tempo, que é uma tendência verificada para todos os grampos, pode ser devida ao re-equilíbrio das tensões na massa de solo escavado e, portanto, uma progressiva redução das cargas nos grampos. No período correspondente ao registro de movimentações na encosta (inclinômetro) não foi encontrada correlação com aumento de cargas nos grampos.



Figura 170 - Evolução de cargas nos strain gages para as barras de 5m em função do período da obra.

A Figura 171 e a Figura 172 apresentam a distribuição de esforços ao longo dos grampos de 5m.

Para o grampo b5a a distribuição está dentro do esperado e já apresentado por Clouterre (1991). Os maiores esforços na parte central são típicos de grampos submetidos às solicitações de escavação da encosta.



Figura 171 - Distribuição de cargas no período de monitoramento - grampo b5a.

Por outro lado, para a barra b5b é possível notar que a distribuição de cargas para os primeiros momentos do monitoramento é compatível com o observado para b5a. No entanto, após algum tempo é possível notar que os maiores esforços concentram-se na parte inicial do grampo. Ocorre uma gradual transferência de esforços da parte central para a extremidade. Este comportamento também pode ser atribuído a uma heterogeneidade localizada para este grampo como foi mostrado por Gomes Silva (2006).



Figura 172 - Distribuição de cargas no período de monitoramento - grampo b5b.

6.3.3.Barras de 10m (28m)

Os grampos instrumentados de 10m foram denominados de b10a e b10b. Foram instalados no dia 13/12/04 e possuíam dez *strain gages*. Cinco *strain gages* não forneceram leituras até o final do período de estudo provavelmente devido à ruptura dos cabos de conexão.

É possível notar uma tendência generalizada ao aumento de carga nos grampos após a instalação dos mesmos (Figura 173). A evolução de cargas nos *strain gages* mostra que o aumento de carga é verificado até o momento em que escavação atinge a cota de 17m. Essa observação é discordante do que foi mostrado por Clouterre (1991). Após este momento há uma tendência geral de redução de cargas. Terminada a fase de escavação, as cargas nos instrumentos se estabilizaram. A solicitação nas barras é crítica nos momentos imediatamente posteriores a instalação dos grampos e escavação da massa de solo sob a sua cota. Mesmo após o término do período de escavação ainda é possível observar variação nas cargas para os grampos.

Strain gages análogos dos dois grampos apresentaram comportamento bastante discordante. A maior diferença foi registrada comparando os extensômetros localizados na extremidade mais interna dos grampos (SG0). O strain gage do grampo b10a estabilizou para uma carga inferior a 20kN e, adversamente, o SG0 do grampo b10b estabilizou para uma carga próxima de 200kN. Essa diferença pode ser atribuída a diferença de rigidez do material que circunda o grampo na região do *strain gage*. Isto é, ou o solo é diferente para os dois casos ou a ocorreu uma baixa penetração de nata de cimento na porção final da barra b10a.

As diferenças para os outros *strain gages* análogos também são grandes para estes grampos e a explicação para tal também fato pode ser devido a menor eficiência da nata em uma determinada região ou à heterogeneidade do solo.



Figura 173 - Evolução de cargas nos strain gages para as barras de 10m em função do período da obra.

A distribuição das cargas ao longo das barras b10a e b10b estão apresentadas na Figura 174 e na Figura 175, respectivamente.

Para o grampo b10a nota-se uma tendência de aumento de carga na parte inicial e na parte final. O meio do grampo parece ser pouco solicitado quanto a transferência de cargas. A comparação entre a penúltima leitura (23/02/05) e a última leitura (12/09/05) mostra a tendência de redução de carga nos grampos. Ocorre um significativo descarregamento da barra.

A distribuição de cargas no grampo b10b corrobora a hipótese de maior eficiência da injeção de nata na porção inferior deste grampo. Após um padrão de transferência de carga similar ao observado para o grampo análogo (b10a), é possível verificar maiores cargas na parte final do grampo, com provavelmente



maior rigidez, devido a injeção de nata mais eficiente. Essa maior rigidez é traduzida em maiores cargas na parte final do grampo.

Figura 174 - Distribuição de cargas no período de monitoramento – grampo b10a.



Figura 175 - Distribuição de cargas no período de monitoramento - grampo b10b..

6.3.4.Barras de 13m (21m)

Os grampos instrumentados de 13m foram denominados de b13a e b13b. Foram instalados no dia 13/12/04 e possuíam doze *strain gages*. Cinco *strain gages* não forneceram leituras até o final do período de estudo. A perda dos *strain gages* ocorreu provavelmente devido a problemas na transmissão dos sinais.

O comportamento dos *strain gages* quanto à evolução de cargas ao longo do tempo é similar ao que foi observado para os outros grampos. Logo após a instalação das barras existe uma tendência de aumento das cargas, esta tendência é invertida após o final da fase de escavação. Algumas variações de cargas são registradas após o término dos serviços de escavação.

De um modo geral, pode-se afirmar que os grampos b13a e b13b são equivalentes uma vez que o nível de carga desenvolvido nos *strain gages* análogos é similar. A maior diferença de carga de estabilização foi verificada para o SG1. Enquanto o SG1 do grampo b13a estabiliza com carga superior a 100kN, o SG1 do grampo b13b estabiliza com carga inferior a 50kN. Essa diferença pode ser atribuída a uma diferença de rigidez na região que é evidenciada com uma trajetória de carregamento concordante no início e discordante para maiores cargas de solicitação.

A distribuição de cargas ao longo dos grampos é fundamental para entender a distribuição de cargas nos grampos com a evolução dos serviços de escavação e durante a vida útil da obra. A Figura 177 e a Figura 178 trazem a distribuição de cargas ao longo dos grampos b13a e b13b, respectivamente.

O grampo b13a mostra que a zona de maior rigidez encontra-se na parte próxima à cabeça do grampo, isto e, próxima à face do talude. Observa-se uma oscilação das cargas ao longo da barra. Novamente a porção central da barra aparenta ter menor rigidez do que as extremidades. Os maiores esforços são desenvolvidos logo após a instalação da barra.

O grampo b13b apresenta comportamento similar ao b13a. A região de maior rigidez localiza-se na parte final da barra, tal como anteriormente. No entanto, a porção central da barra apresenta maior rigidez, que é representada com maiores cargas nesta região do grampo.



Figura 176 - Evolução de cargas nos strain gages para as barras de 13m em função do período da obra.

Não foi possível notar para ambos os casos uma tendência de relaxação significativa das cargas nas barras de monitoramento. Os grampos parecem trabalhar de forma satisfatória auxiliando no processo de estabilização da encosta. A maior variação das cargas ocorre nos momentos imediatamente posteriores à instalação dos grampos em comparação às variações após o avanço da escavação, indicando a mobilização dos grampos para o reforço local do talude.



Figura 177 - Distribuição de cargas no período de monitoramento – grampo b13a.



Figura 178 - Distribuição de cargas no período de monitoramento – grampo b13b.

6.3.5.Barras de 15m (17m)

Os grampos instrumentados de 15m foram denominados de b15a e b15b. Foram instalados no dia 25/01/05 e possuíam catorze *strain gages*. Apenas dois *strain gages* não forneceram leituras até o final do período de estudo.

A Figura 179 apresenta a evolução das cargas para os *strain gages* instalados nos grampos de 15m. Logo após a instalação dos grampos instrumentados e prosseguimento dos serviços de escavação, verifica-se um aumento de carga. Este comportamento é similar ao verificado em outros grampos. A grande variação de cargas ocorre dentro do período de escavações. Após o período de escavação nota-se uma tendência a estabilização das cargas. É importante destacar que não foi observado aumento de carga no período de monitoramento em função dos deslocamentos registrados para os demais instrumentos da encosta.

Os strain gages análogos apresentam, de um modo geral, comportamento equivalente. Os instrumentos que devem ser destacados são os SG0 e os SG6 dos dois grampos (b15a e b15b). Novamente uma diferença de rigidez pode ter favorecido a ocorrência de cargas de estabilização e trajetória de cargas tão diferentes para os dois casos. Para o SG0 do grampo b15a a carga de estabilização foi de aproximadamente 140kN, enquanto que para o SG0 da b15b a carga de estabilização foi de aproximadamente 50kN. Ambos os *strain gages* apresentavam trajetória de cargas similares até o momento em que ocorre uma redução da carga do SG0 do grampo b15b.

Para os *strain gages* denominados SG6 o comportamento é diferenciado. Os dois instrumentos possuem a mesma trajetória de evolução de cargas no início das leituras. No entanto o SG6 do grampo b15a estabiliza para uma carga próxima a 100kN, enquanto que o SG6 do grampo b15b continua sua trajetória e só estabiliza para uma carga superior a 140kN. Essa diferença pode ser devida à heterogeneidade do maciço com módulos de rigidez diferentes para as mesmas regiões análogas dos grampos. É possível observar também que alguns *strain gages* apresentam perda e ganho de carga, somente estabilizando para cargas mais elevadas.



Figura 179 - Evolução de cargas nos strain gages para as barras de 15m em função do período da obra.

A Figura 180 e a Figura 181 mostram a distribuição de cargas para os grampos b15a e b15b, respectivamente.

O grampo b15a apresenta uma distribuição de cargas com o tempo ao longo da barra bastante oscilante. No início das leituras, a porção final do grampo (ponta) é responsável pelo desenvolvimento dos maiores esforços. À medida que a escavação prossegue ocorre uma redistribuição das cargas ao longo do grampo.

A distribuição final apresentada (21/11/05) mostra que as extremidades do grampo b15a possuem as maiores cargas no final do período de monitoramento. Ocorre uma gradual redistribuição de esforços da parte central para as periferias do grampo.

A distribuição de cargas ao longo do grampo b15b é mais regular do que foi observado para o grampo anterior (b15a). As primeiras leituras efetuadas demonstram que a parte central responde pela concentração dos maiores esforços, no entanto, com a continuação da escavação os esforços tendem a se uniformizar.

A distribuição final de cargas (21/11/05) é praticamente constante, destacando-se que a parte próxima ao talude (cabeça do grampo) é responsável



pelos maiores esforços em detrimento a parte mais interna (ponta do grampo). A redistribuição de cargas na parte central é pouco significativa para este grampo.

Figura 180 - Distribuição de cargas no período de monitoramento - grampo b15a.



Distribuição de Cargas - Barra 15b

Figura 181 - Distribuição de cargas no período de monitoramento – grampo b15b.

O monitoramento das cargas nos grampos mostrou-se fundamental para o melhor entendimento sobre a eficiência dos grampos e para a distribuição de

cargas nos mesmos. De um modo geral, foram observadas ocorrências de perda de resistência que devem ter relação com a diferença de rigidez do maciço de solo em contato com o grampo. Essa diferença pode ser atribuída tanto a heterogeneidade do material, como a diferença de penetração e eficiência da injeção de nata de cimento que circunda a barra de aço.

Verificou-se um aumento das cargas com a continuação dos serviços de escavação. Para os grampos instalados na parte superior da encosta é possível observar três fases distintas em seu comportamento: carregamento, estabilização e redistribuição de cargas, mesmo que mínima. Por outro lado, para os grampos maiores e localizados nas partes inferiores do talude ocorre apenas o carregamento e a estabilização.

Os strain gages responderam de forma satisfatória aos objetivos do projeto de estabilização e mostraram-se ferramentas aplicáveis no monitoramento de grampos. A eficiência no que tange a durabilidade foi de aproximadamente 33%. A maioria dos *strain gages* instalados forneceu leituras satisfatória e não foram registradas perdas de instrumentos durante o transporte ou instalação dos grampos. A perda de *strain gages* ocorreu, quase que totalmente, após o término da escavação.

A análise da distribuição de cargas ao longo dos grampos mostrou que a heterogeneidade do terreno e a menor eficiência da nata de cimento em alguns pontos podem ser fatores que influenciam o mecanismo de distribuição de cargas ao longo dos grampos. Os resultados obtidos não correspondem, na maioria dos casos, ao reportado por Clouterre (1991).

A maior concentração de cargas ocorre muito provavelmente nas regiões de maior rigidez do maciço de solo em contato com o grampo. São essas regiões que determinam a carga que o grampo irá resistir. A distribuição de cargas proposta por Clouterre (1991) refere-se a um solo homogêneo e por esse fato não pode ser comparada com o que foi obtido nessa pesquisa. Lima (2007) que realizou pesquisa no talude adjacente obteve distribuições de cargas que confirmam esta observação.

6.4. Análise Conjunta de Dados de Instrumentação

O projeto de instrumentação da encosta visou à obtenção dos deslocamentos no talude e as cargas nos grampos instrumentados. Os inclinômetros e os *tell tales* foram analisados em conjunto na seção anterior. Uma análise conjunta de todos os dados de instrumentação é importante para

entender o comportamento do maciço para as diferentes fases da escavação e serviço que foram monitoradas.

A escolha dos elementos que foram utilizados na análise conjunta levou em consideração o bom funcionamento dos instrumentos e a representatividade dos mesmos quanto ao comportamento da obra.

Portanto, a análise conjunta foi realizada considerando os instrumentos listados na Tabela 40. A seqüência da Figura 182 a Figura 186 apresenta as curvas de deslocamento em função do tempo dos instrumentos selecionados.

Cota (m)	Inclinômetro	Tell Tale	Strain Gage	Figura
40	INC-01	TT3	SG0 – b4a e b4b	Figura 182
34	INC-01	TT6	SG0 – b5a e b5b	Figura 183
28	INC-01	TT9	SG0 – b10a e b10b	Figura 184
21	INC-01	TT12	SG0 – b13a e b13b	Figura 185
17	INC-01	TT14	SG0 – b15a e b15b	Figura 186

Tabela 40 - Instrumentos utilizados na análise conjunta dos dados

Para a cota 40m (Figura 182) pode-se afirmar que os *tell tales* e o os inclinômetros (para a cota considerada) comportaram-se de forma quase que equivalente, inclusive quanto à magnitude dos deslocamentos. Estes instrumentos também indicaram uma maior movimentação para os momentos finais de monitoramento. Quanto às cargas nos grampos pode-se propor que se comportaram dentro do esperado: uma fase inicial de aumento de cargas, uma segunda de estabilização e por algumas vezes uma última fase de redução das cargas (para alguns instrumentos somente). As cargas de solicitação no grampo não indicaram a movimentação da encosta citada anteriormente.

A instrumentação da cota 34m (Figura 183) também se comportou de forma similar ao observado para a cota superior (40m). As leituras de inclinômetros e *tell tales* forneceram padrão de curvas e magnitude de deslocamentos bastante próximos. Ambos os instrumentos indicam acentuadas movimentações no período final de leituras. Quanto à carga nos grampos é possível identificar as fases de carregamento e estabilização, as quais estão de acordo com o andamento dos serviços de escavação da encosta. A carga de estabilização para ambos os *strain gages* são equivalentes. As leituras de carga não retratam o aumento de deslocamentos percebidos pelos inclinômetros e *tell tales*.



Figura 182 - Análise Conjunta dos Dados de Instrumentação - Cota 40m.



Figura 183 - Análise Conjunta dos Dados de Instrumentação - Cota 34m.

A análise conjunta dos instrumentos para a cota 28m (Figura 184) mostra a boa concordância entre o inclinômetros e o *tell tale*. A análise das cargas nos grampo, no entanto, apresenta uma diferença importante. Enquanto que um dos grampos (b10b) ganha carga até estabilizar-se, o outro (b10b) mostra um aumento de carga seguido de súbita queda e conseqüente estabilização. A perda de resistência pode ser atribuída a heterogeneidade do maciço ou a uma baixa eficiência da nata de cimento na região do SG0.

Os grampos instrumentados da cota 21m (Figura 185) comportam-se de forma bastante similar ao já observado anteriormente. A leitura fornecida pelo *tell tale* chama a atenção quando a importante movimentação da encosta. Está movimentação é pouco percebida para o inclinômetro considerado e não é observada através do aumento de carga nos grampos. Este comportamento pode ser atribuído a uma deficiência da nata de cimento circundante.



Figura 184 - Análise Conjunta dos Dados de Instrumentação - Cota 28m.



Figura 185 - Análise Conjunta dos Dados de Instrumentação - Cota 21m.

A cota 17m também foi analisada quanto ao conjunto dos dados de instrumentação disponíveis (Figura 186). A similaridade dos resultados dos *tell tales* e dos inclinômetros (na direção principal da cota considerada) confirmam que estes instrumentos possuem utilidade prática e devem ser programados para futuros projetos de investigação para a medição de deslocamentos internos. As cargas para os grampos, diferente do encontrado na cota anterior, possuem uma trajetória equivalente até o momento no qual é atingida a carga de estabilização. O grampo b15a parece estar inserido em material mais rígido do que o b15b, a carga de estabilização do b15a é o dobro da indicada pelo grampo b15b. Não foram observados nos grampos indícios de aumento de carregamento associados às movimentações das encostas.



Figura 186 - Análise Conjunta dos Dados de Instrumentação - Cota 17m.

6.5. Distribuição das tensões nos grampos e ponto de tração máxima

O mecanismo de interação solo-grampo que se desenvolve no interior de um maciço submetido a uma escavação grampeada é bastante complexo. As solicitações que ocorrem nos grampos são, de um modo geral, forças trativas resultantes do desconfinamento lateral do maciço em função das escavações sucessivas.

A opção de projeto utilizada para esta obra propôs a colocação de grampos curtos na parte superior do talude e longos na parte inferior. Este tipo de arranjo faz com que a parede escavada comporte-se como um muro de peso.

Os grampos colocados na face trabalham como elementos de enrijecimento da face. Os resultados de instrumentação de grampos e de análises numéricas indicam que a força de tração máxima varia em função da forma de fixação do grampo, da eficiência da nata de cimento injetada e de possíveis heterogeneidades litológicas ao longo do grampo. Por exemplo, grampos livres em solo homogêneo e injeção de nata de cimento eficiente são mais solicitados na parte interna do talude, enquanto que grampos fixados na face, sob as mesmas condições anteriores, possuem as maiores solicitações nas proximidades da face.

A determinação do ponto ou região onde a tensão de tração é máxima não é tarefa simples. A instrumentação instalada fornece dados que são fundamentais para delimitar uma provável região de maiores solicitações, região que irá dividir o maciço em zona passiva e ativa. A Figura 187 apresenta a zona de tração máxima em função dos dados fornecidos pelos *strain gages* para o final da construção (início do ano de 2005).



Figura 187 - Localização da Zona de Tração Máxima em função dos pontos de tração máxima fornecidos pelos grampos instrumentados.

Tal como mostrado na Figura 187, a região onde a tração nos grampos é máxima situa-se a certa distância da face do talude. É importante destacar que para o grampo de 5m a região se situa após a ponta do mesmo. Na região de

tração máxima é possível propor uma linha potencial de ruptura global do talude (Krahn, 2001 e Lima, 2007). Esta superfície divide a massa de solo em duas regiões distintas, confirmando a hipótese do mecanismo de ruptura com regiões ativas e passivas (Clouterre, 1991; Cardoso e Gonçalves, 1997; Springer, 2001 e Lima, 2007). No caso do Museu II, os grampos instrumentados comportam-se como livres em relação à fixação na face de escavação.

A zona considerada como ativa está imediatamente atrás da face de escavação (as tensões cisalhantes dirigem-se para fora). Por outro lado, 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.

Considerando o topo do talude em solo grampeado, este parâmetro equivale a uma distância aproximada de 3m (ou 0,08H; sendo H=32m a altura do talude grampeado). Lima (2007) obteve um valor de 0,42H (H=24m) para este parâmetro. Essa sensível diferença reforça a hipótese de que as duas obras apesar de serem adjacentes, possuem comportamento e mecanismo de transferência de carga diferenciado em função das concepções de projeto distintas.

A obra reportada por Lima (2007) possui grampos longos na parte superior do talude. O comprimento dos grampos diminui à medida que a cota do talude diminui. Além disso, Lima (2007) possuía grampos com comprimento consideravelmente superiores. A concepção de projeto da obra Museu I (Lima, 2007) tem comportamento típico de um talude grampeado. Por outro lado, o projeto do Museu II propõe um sistema equivalente a um muro de peso. Isto é, os grampos instalados funcionam como elementos de maior rigidez na parede de escavação.

Pode-se considerar que a superfície de ruptura ilustrada na Figura 187 assume uma forma circular, compatível com aquelas definidas nas hipóteses das análises em equilíbrio limite e comumente utilizadas nos projetos de solo grampeado.

No entanto, a Figura 188 apresenta outra proposta de linha de tração máxima. Para esta segunda hipótese, considera-se os métodos com superfície planar ou bi-linear (por exemplo, o Método Alemão). Este caso é diferente do proposto por Lima (2007), evidenciando as conseqüências distintas das concepções de projeto utilizado para os dois casos: Museu I e Museu II.



Figura 188 - Localização da Zona de Tração Máxima em função dos pontos de tração máxima fornecidos pelos grampos instrumentados.

6.6. Magnitude dos deslocamentos máximos no talude

A magnitude dos deslocamentos em alguns pontos do interior dos taludes, seja por meio de inclinômetro ou *tell-tale*, foi obtida durante as fases de escavação e monitoramento.

No entanto, para uma melhor análise dos deslocamentos com a minimização da influência do ponto de instalação dos instrumentos, faz-se necessária uma análise com parâmetros normalizados, isto é, com parâmetros que sejam razão da altura de escavação em função da altura de escavação máxima e também do deslocamento em função do deslocamento máximo observado no instrumento.

A Figura 189 apresenta os resultados obtidos para o Inclinômetro 01 levando-se em consideração a razão de deslocamento dos instrumentos (δ/δ_{max}) em função do nível de escavação (H/H_{esc}).

É possível observar que as leituras relativas ao ponto correspondente à cota 40m foram as que mais sofreram deslocamentos mesmo após o fim das escavações (H/H_{esc}=1). Ao final da escavação os deslocamentos representavam apenas 50% ($\delta/\delta_{max} = 0,5$) dos deslocamentos máximos medidos. Esta informação confirma o alto nível de deslocamentos que o maciço esteve submetido mesmo após o término dos serviços de escavação.
Por outro lado, o ponto correspondente à cota 17m foi aquele que menos se deslocou após o término dos serviços de escavação. É interessante lembrar que estamos tratando de um maciço em solo residual com perfil de intemperismo bem desenvolvido. Logo, o material presente na parte superior corresponde a um solo com alto nível de intemperização e submetido a maiores deslocamentos em função do desconfinamento lateral. Por outro lado, o ponto referente à cota 17m localiza-se em região onde o material foi pouco intemperizado, com características reliquiares.

А

Tabela 41 resume o nível de escavação no qual o ponto estava submetido no início da instrumentação e o percentual de deslocamentos medidos para os pontos, no final da escavação, em relação ao deslocamento máximo observado para o inclinômetro I-01.



Figura 189 - Análise normalizada dos deslocamentos em função da altura de escavação para o I 01.

A Figura 190 apresenta os resultados obtidos para o inclinômetro I-03 levando-se em consideração a razão de deslocamento dos instrumentos (δ/δ_{max}) em função do nível de escavação (H/H_{esc}). O inclinômetro I-03 apresentou grandes deslocamentos mesmo após o término das obras de escavação. Este instrumento está localizado mais próximo à face do talude, logo, sofre maior influência dos efeitos do desconfinamento lateral.

Cota (m)	Nível de Escavação (H/H _{esc})	Razão de Deslocamentos ($\delta\!/\delta_{max}$)	
	para o Início do Monitoramento	para o Final de Escavação (H/H _{esc} =1)	
40	0,5	0,49	
34	0,35	0,88	
28	0,12	0,73	
21	Zero	0,73	
17	Zero	1,00	

Tabela 41 - Nível de escavação para o início do monitoramento e razão de deslocamentos para o final de escavação em função da cota para o Inclinômetro 01.

Outro aspecto que pode ser observado é que todas as cotas monitoradas apresentaram razão de deslocamento (δ/δ_{max}) inferior a 0,40. Conclui-se que para o inclinômetro I-03, no final do período construtivo, os deslocamentos corresponderam a menos do que 40% do que os deslocamentos máximos monitorados. Dessa forma, ao contrário do que foi observado para o inclinômetro I-01, não ocorreu estabilização evidente dos deslocamentos durante o período de monitoramento.

A Tabela 42 resume o nível de escavação no qual cada ponto estava submetido no início da instrumentação e o percentual de deslocamentos medidos para os pontos, no final da escavação, em relação ao deslocamento máximo observado para o inclinômetro I-03.

As leituras correspondentes a cota 40m demonstram uma aceleração dos deslocamentos após a conclusão dos serviços de escavação. Comparando-se a razão de deslocamentos para a cota 40m em ambos os inclinômetros observa-se que existe uma tendência ao crescimento das deformações com o tempo. Conclui-se que quanto mais próximo da extremidade do talude o inclinômetro estiver, maior será a sua tendência de deslocamento devido aos efeitos de desconfinamento lateral (escavação da encosta).



Figura 190 - Análise normalizada dos deslocamentos em função da altura de escavação para o Inclinômetro 03

A comparação com os dados de carga nos grampos instrumentados nessa região não acusou o aumento das cargas de tração.

Cota (m)	Nível de Escavação (H/H _{esc})	Razão de Deslocamentos (δ/δ_{max})	
	para o Início do Monitoramento	para o Final de Escavação (H/H _{esc} =1)	
40	0,50	0,29	
34	0,30	0,40	
28	0,09	0,34	
21	Zero	0,30	
17	Zero	0,30	

Tabela 42 - Nível de escavação no início do monitoramento e razão de deslocamentos para o final de escavação em função da cota para o inclinômetro I-03.

A Figura 191 apresenta os resultados obtidos para os *tell tales* levando-se em consideração a razão de deslocamento dos instrumentos (δ/δ_{max}) em função do nível de escavação (H/H_{esc}). Verifica-se uma grande variabilidade de deslocamentos após a conclusão das escavações em função das diversas cotas de instalação dos instrumentos. A caixa 05 (cota 17m) apresentou grandes deslocamentos mesmo após o término das obras de escavação. Este resultado é discordante com o que foi observado nos inclinômetros. Esse comportamento

pode ser atribuído às características do instrumento e principalmente pelo fato das caixas de *tell tales* não corresponderem a pontos fixos de referência das leituras.

Este tipo de instrumento está sujeito aos efeitos de fluência e relaxação dos cabos e demais peças que compõem o sistema. Conclui-se que grande parte dos deslocamentos obtidos por meio dos *tell tales,* corresponda a deslocamentos do sistema e não exclusivamente do maciço

Além disso, para a obtenção dos valores de deslocamentos é necessário considerar os deslocamentos da face do talude onde as caixas foram fixadas. A utilização de medições topográficas é uma importante ferramenta na calibração e interpretação dos resultados. Este acompanhamento não foi executado para a obra Museu II.

A Tabela 45 resume o nível de escavação no qual cada ponto estava submetido no início da instrumentação e o percentual de deslocamentos medidos para os pontos, no final da escavação, em relação ao deslocamento máximo observado para os *tell tales*.

Nota-se uma grande variabilidade da razão de deslocamentos para o final da escavação (H/H_{esc} = 1). Os *tell tales* situados nas cotas superiores foram aqueles que apresentaram as maiores razões de escavação para o final da construção (superior a 40%).



Figura 191 - Análise normalizada dos deslocamentos em função da altura de escavação para os *tell tales*.

Cota (m)	Nível de Escavação (H/H _{esc})	Razão de Deslocamentos ($\delta\!/\delta_{max}$)
	para o Início do Monitoramento	para o Final de Escavação (H/H _{esc} =1)
40	0,08	0,58
34	0,09	0,40
28	0,20	0,30
21	0,10	0,20
17	0,41	0,20

Tabela 43 - Nível de escavação para início do monitoramento e razão de deslocamentos para o final de escavação em função da cota para os *tell tales*.

6.7. Magnitude das forças de tração máxima nos grampos

O monitoramento dos esforços de tração, desenvolvidos em cada um dos grampos instrumentados durante as fases de escavação e monitoramento, permitiu a obtenção das tensões máximas. A Tabela 44 resume as informações referentes às tensões máximas.

Mesmo para grampos adjacentes verifica-se uma grande diferença na razão entre a tração final e a tração máxima (grampos de 4m, por exemplo). Essa diferença pode ser atribuída à heterogeneidade do maciço e à presença de materiais estranhos ao maciço (cupinzeiros). As maiores diferenças são observadas para os pares de grampo b4a e b4b e para b10a e b10b.

Os grampos de 4m apresentaram diferença superior a 30% em relação a razão de tração máxima. O grampo b4b apresentou razão superior a 90%. Conclui-se que para o final do monitoramento o grampo manteve as cargas máximas. Por outro lado, para o grampo b4a, é possível perceber uma relaxação das cargas nos grampos. Este comportamento pode ser devido ao efeito de redistribuição dos esforços no maciço de solo após as escavações e grampeamento.

Para os grampos b10a e b10b a diferença entre as razões de tração máxima foram de aproximadamente 60%. A região onde foram instalados estes grampos correspondem a transição entre um solo residual maduro e um solo residual jovem. Adicionalmente, o mapeamento geológico mostrou que a região possui alguns veios de pegmatito o que também podem ter contribuído para conferir ao grampo características de resistência distintas.

Grampo	Esforço Máximo		Final do Monitoramento	Razão entre Tração
			(05/03/07)	Final e Tração Máxima
•	Tração (kN)	Data	Tração (kN)	
b4a	320	25/10/04	204	0,64
b4b	211	08/11/04	197	0,93
b5a	144	21/12/04	61	0,42
b5b	111	21/11/05	73	0,66
b10a	116	23/02/05	32	0,28
b10b	203	21/01/05	197	0,97
b13a	205	03/02/05	111	0,54
b13b	125	03/02/05	76	0,61
b15a	172	03/03/05	137	0,80
b15b	175	03/03/05	143	0,82

Tabela 44 - Cargas de Tração Máxima e Cargas no Final de Monitoramento para os grampos instrumentados

A Tabela 45 compara os esforços de tração máximos medidos nos grampos com a carga de escoamento da barra de aço utilizada. De uma maneira geral, os grampos apresentaram grande variabilidade nesse aspecto. Os valores variaram entre 84% e 44% da carga de escoamento.

O grampo b4a forneceu uma leitura de carga superior (320kN) à carga de escoamento (250 kN). No período em que esta leitura foi verificada foi tomada a decisão de mudança da técnica de escavação. Até então, a escavação vinha sendo executada em patamares contínuos com grande avanço da altura escavada. Após esta leitura, decidiu-se em alterar o processo executivo e optou-se pela execução da escavação em nichos. O objetivo desses nichos era o de minimizar os efeitos de desconfinamento, reduzir os deslocamentos do maciço e, por conseqüência, diminuir as cargas dos grampos. Tal aspecto já foi abordado neste trabalho.

Valores superiores à carga de escoamento representariam a ruptura da barra de aço. Acredita-se que ocorreu uma grande variação de carga no período (25/10/04) que foi bastante reduzida após a nova opção construtiva (escavação em nichos). No entanto, a magnitude da carga (320 kN) pode ser questionada e atribuída a imprecisões do sistema de medições das cargas. Pequenas variações na alimentação do sistema podem gerar grande variação nos dados obtidos. Após este fato, controlou-se a carga de alimentação do sistema. A hipótese de ruptura do grampo não é válida uma vez que não foram observados

deslocamentos exagerados e o mesmo continuou a oferecer resistência, estabilizando a uma carga de 160 kN (60% da carga de escoamento).

Grampo	Esforço Máximo	Razão entre Carga de Escoamento
		(250kN) e Tração Máxima
b4a	320(*)	1,28(*)
b4b	211	0,84
b5a	144	0,58
b5b	111	0,44
b10a	116	0,46
b10b	203	0,81
b13a	205	0,82
b13b	125	0,50
b15a	172	0,69
b15b	175	0,70

Tabela 45 - Cargas de Tração Máxima e Cargas no Final de Monitoramento para os grampos instrumentados

(*) O valor obtido da leitura está acima da carga de escoamento.

A Figura 192 apresenta as curvas de força de tração máxima normalizada em relação à força de escoamento (F Máxima / F Escoamento) em função da razão de escavação total do talude (H escavação / H total). O gráfico demonstra uma tendência generalizada de estabilização das cargas ao final dos serviços de escavação. Entretanto para os grampos de 10m e 15m não é observada a tendência de estabilização.

Os grampos de 10m apresentam a tendência de aumento das cargas à medida que a escavação progrediu, enquanto que os grampos de 15m apresentação tendência inversa (diminuição de cargas).



Figura 192 - Força de Tração Máxima normalizada em função do avanço da escavação

6.8. Resumo de Instrumentação e Monitoramento

A instrumentação é importante para acompanhar os deslocamentos durante e após a escavação. Neste trabalho, o monitoramento foi realizado com inclinômetros e *tell tales*, para medidas de deslocamento horizontal, e barras instrumentadas com strain gages, para medidas de carga nos grampos. Esta concepção privilegiou a redundância de medidas com instrumentos diversos, permitindo avaliar a eventual possibilidade de ruptura do talude, e fornecendo indicadores da velocidade de avanço da escavação.

O projeto de instrumentação proposto mostrou-se eficiente para o acompanhamento das fases de escavação e monitoramento da obra. Os instrumentos selecionados permitiram leituras de deslocamentos da encosta para diferentes cotas e também das cargas mobilizadas nos grampos durante o período de monitoramento. As leituras contínuas dos instrumentos permitiram o acompanhamento da obra de um modo global, sendo possível a identificação de dos efeitos das condições de escavação e outros aspectos construtivos da parede grampeada.

Os inclinômetros, além da robustez e simplicidade de operação, apresentam a vantagem de serem bastante utilizados em geotecnia. Estes instrumentos mostraram-se eficientes na obtenção dos deslocamentos pontuais e para o deslocamento global do maciço. Este instrumento constitui em ferramenta fundamental na obtenção de uma superfície preferencial de deslocamentos (superfície potencial de ruptura). A interpretação dos dados obtidos corroborou a observação de aspectos geológicos marcantes na encosta, tais como a identificação de falhas. No entanto, os custos são elevados e os cuidados com a proteção do tubo de acesso são fundamentais para o sucesso do monitoramento.que podem inviabilizá-los ou levarem a interpretação errada das informações obtidas.

Os *tell tales* são medidores mecânicos de baixo custo, robustos, imunes a oscilações elétricas e térmicas, e de fácil montagem e operação. Os inconvenientes deste tipo de dispositivo reside na sua resolução limitada a 0,5mm e a tendência de relaxação do sistema. Além disso, recomenda-se que a caixa de *tell tales* também seja monitorada quanto aos deslocamentos por meio de topografia. Os resultados do monitoramento por *tell tales* realizado neste trabalho indicaram um desempenho similar ao dos inclinômetros.

A análise conjunta dos dados de inclinometria e dos *tell tales* mostrou que os instrumentos funcionam de modo equivalentes e que é possível por meio dessas informações determinar regiões de deslocamentos preferencial no maciço. Estas regiões podem não ser coincidentes, mas determinam uma tendência de comportamento quanto aos deslocamentos no interior do talude.

Os grampos instrumentados com *strain gages* mostraram um desempenho adequado, aliado a custos acessíveis. Os resultados de calibração das barras instrumentadas indicaram um comportamento elástico linear, com histerese desprezível, fornecendo constantes de calibração semelhantes em todos os *strain gages*. Os procedimentos de preparação das barras, e de colagem e proteção dos *strain gages* e circuitos elétricos são trabalhosos. No entanto, mostraram-se adequados, tanto na estabilidade e resolução das medidas, quanto na reduzida vulnerabilidade aos processos de transporte e instalação das barras, saturação do maciço e solicitação dos grampos instrumentados.

Além disso, o sistema de monitoramento por meio de grampos instrumentados apresentou bom desempenho quanto a durabilidade dos *strain gages*. O arranjo dos *strain gages* ao longo das grampos mostrou-se eficaz na obtenção da distribuição de cargas ao longo das barras. Essa distribuição de cargas é determinante para o entendimento do mecanismo de transferência de

cargas ao longo do comprimento do grampo e também para a determinação do ponto de tração máxima, o qual divide as zonas passivas e ativas de um maciço grampeado.

A análise das cargas nos grampos também permitiu que as hipóteses de comportamento da parede grampeada fossem discutidas. Conclui-se que o tipo de projeto utilizado para a obra Museu II faz com que os grampos funcionem como elementos de reforço na massa do talude, isto é, a massa de solo grampeada funciona como um muro de peso, diferente do que foi observado por Lima (2007) na obra Museu I.

A análise normalizada dos dados em função dos deslocamentos máximos, altura total de escavação, carga máxima ou carga de escoamento permitem a análise conjunta dos dados para diferentes cotas do talude, diferentes comprimentos de grampos ou diferentes instrumentos de monitoramento.

De acordo com o inclinômetro I-01, verifica-se a estabilização dos deslocamentos. Por outro lado, para o inclinômetro 03 nota-se uma tendência de continuidade de deslocamentos que pode ser atribuída a uma falha geológica existente na região.

Os *tell tales* apresentam também uma tendência ao aumento de deslocamentos que podem ser atribuídos a uma possível relaxação do sistema.

Os grampos, de uma maneira geral, não registram aumento de cargas uma vez que as mesmas estão estabilizadas, com exceção dos grampos instalados na cota 28m.