

5 Investigação de Campo

Além da campanha de ensaios de laboratório, esta pesquisa também realizou uma campanha de investigações de campo, com o objetivo principal de caracterizar o maciço por meio de mapeamento geológico, sondagens a percussão e ensaios de arrancamento. A campanha de investigação de campo pode ser dividida em duas etapas principais:

(a) Fase de projeto: execução de ensaios a percussão (tipo SPT) para a determinação do perfil estratigráfico e distribuição do N_{spt} ao longo da profundidade;

(b) Fase de construção: realização de mapeamento geológico detalhado e ensaios de arrancamento que visaram complementar as informações referentes a obra de solo grampeado.

5.1. Sondagem a percussão - SPT

As sondagens de simples reconhecimento à percussão consistem basicamente na cravação de um amostrador padrão no solo, através da queda livre de um peso de 65kgf (martelo), caindo de uma altura pré-determinada (75cm). As características do amostrador, bem como os procedimentos de execução do ensaio estão especificados na NBR 6484/2001 (Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos).

Foram realizados 7 furos de sondagens (SP-01 a SP-07) que indicaram solo residual de gnaiss constituído por misturas silto-argilosas ou argilo-siltosas, às vezes com presença de pedregulhos, de coloração variável, desde o branco ao marrom escuro.

A camada de solo residual apresentou SPT praticamente crescente com a profundidade. A Figura 89 e a Figura 90 mostram a distribuição de N_{spt} com a profundidade para todos os furos executados. A Figura 91 mostra a localização dos furos no terreno. Maiores detalhes quanto a execução destes furos podem ser obtidas em Geoprojetos (2004).

O valor de $N_{spt} = 60$ foi fixado como limite para a apresentação nos gráficos. Para o furo SP03 é possível notar um elevado valor de golpes para as

primeiras camadas. Este fato deve-se a provável existência de um aterro ou de sub-base mais competente na área do furo.

A tendência de aumento do valor do N_{spt} com a profundidade também pode ser observada na Figura 89 e na Figura 90. Este comportamento é típico de perfis de intemperismo de solo residual, compostos por uma primeira camada de solo maduro menos resistente, seguida de camada de solo residual jovem e rocha alterada. Este aspecto já foi analisado e confirmado pelos ensaios de laboratório apresentados no capítulo anterior.

Geoprojetos (2004) destaca que os parâmetros geotécnicos dos materiais envolvidos nas análises de estabilidade basearam-se em classificação geológico-geotécnica dos materiais atravessados pelas sondagens executadas, avaliação de SPT, consulta bibliográfica e experiências de obras semelhantes nas imediações do terreno em foco. Desta forma, o valor da resistência ao arrancamento (q_s) foi estimado utilizando a seguinte expressão:

$$q_s = 50 + 7,5 \times N_{SPT} \text{ (em KPa)} \quad \text{Equação 8}$$

Na Tabela 21, Geoprojetos (2004) apresenta os valores de q_s para algumas faixas de profundidades do talude, definindo-se três níveis de escavação. Não foram considerados os valores de N_{SPT} superiores a 45 golpes.

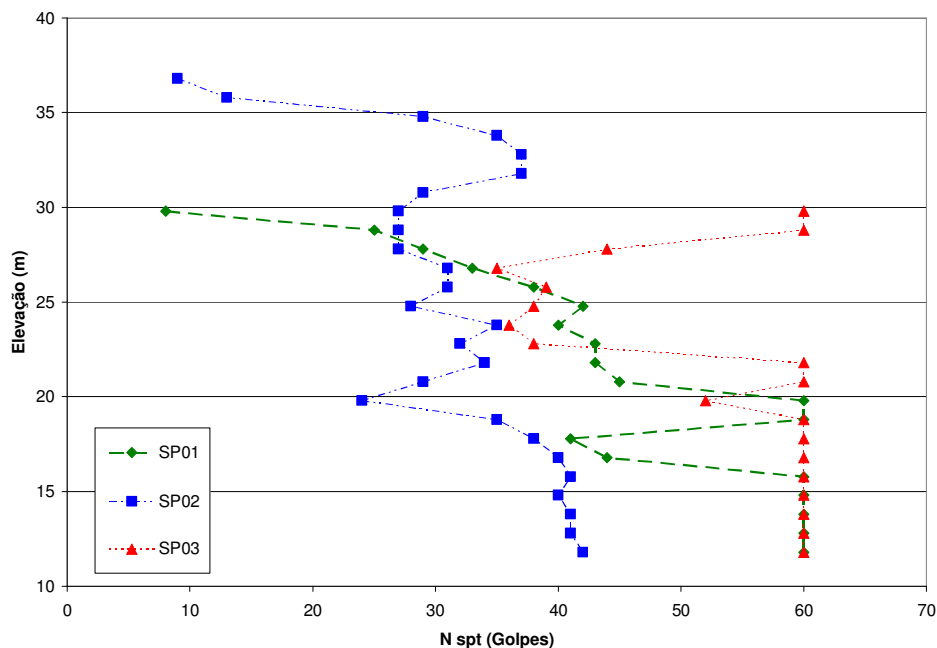


Figura 89 - Distribuição do Valor N_{spt} para SP01, SP02 e SP03.

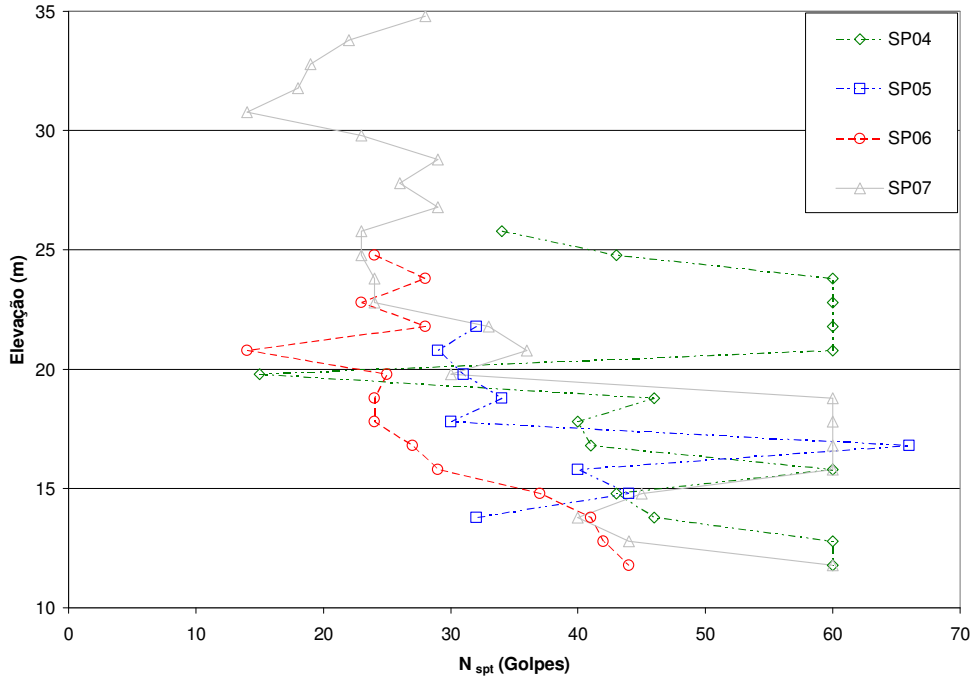


Figura 90 - Distribuição do Valor N_{spt} para SP04, SP05, SP06 e SP07.

Tabela 21 - Valores de q_s obtidos em função dos ensaios SPT

Elevação (m)	Valor médio q_s (kPa)	Valor de projeto q_s (kPa)
Acima de 29m	228	160
Entre 22 e 29m	286	190
Entre 10 e 22m	316	220

Os valores de projeto adotados são da ordem de 65% a 70% dos valores médios obtidos. Dessa forma, o fator de minoração de resistência (fator de segurança) é da ordem de 1,5.

É possível também observar uma clara tendência de aumento do valor de q_s em função da diminuição da elevação. Este fato deve-se ao fato da encosta corresponder a um perfil típico de intemperismo e do valor de q_s ser diretamente proporcional ao valor de N_{SPT} . O aumento do valor do parâmetro com a profundidade é questão bastante discutida no meio técnico. As análises dos itens seguintes mostram que o valor de q_s não tem relação direta com a profundidade para a situação estudada.

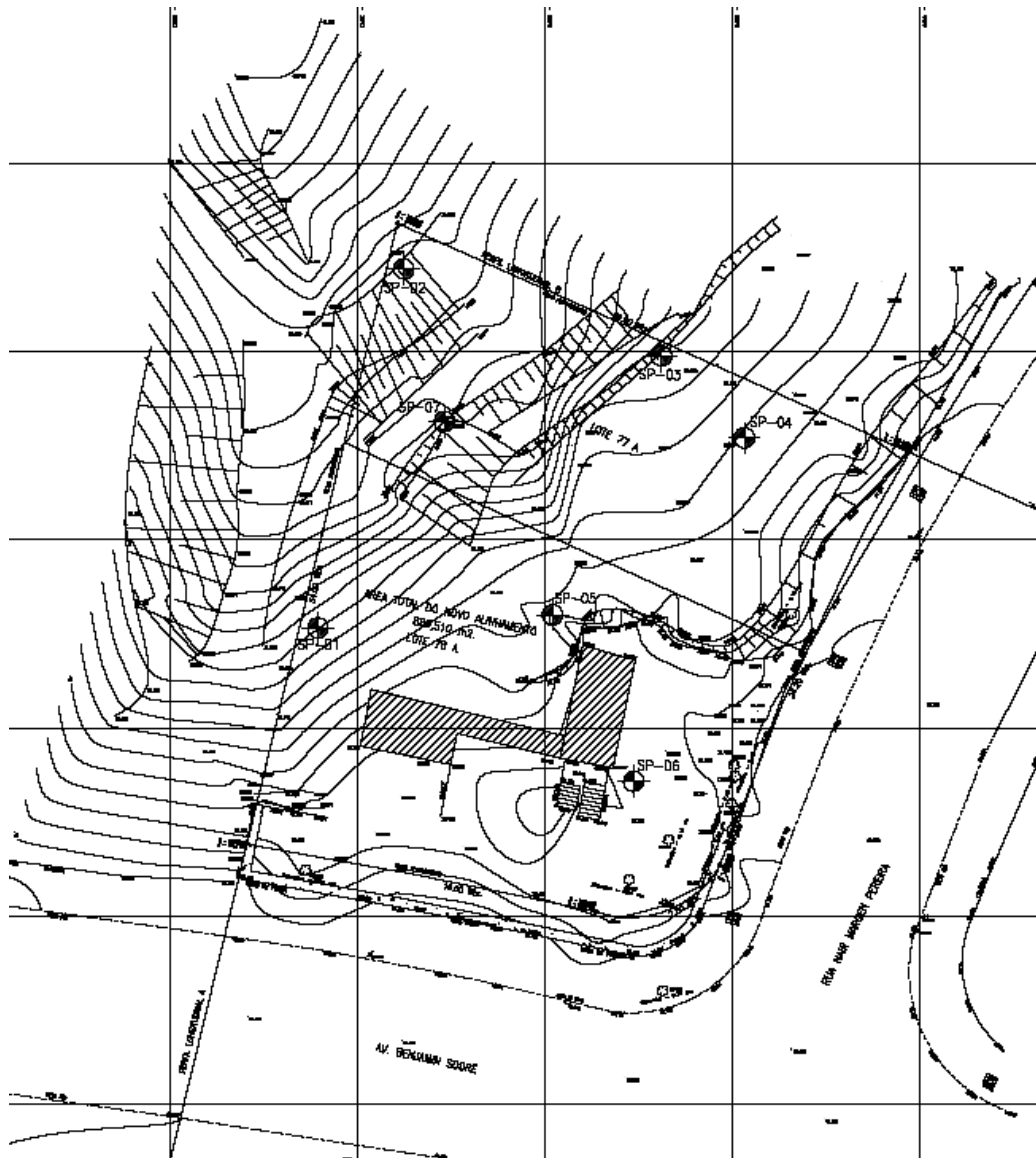


Figura 91 - Localização dos furos de sondagem no terreno (Geoprojetos, 2004)

5.2. Mapeamento Geológico - Modelo Tridimensional

Durante os serviços de execução da parede grampeada foi realizado um contínuo trabalho de mapeamento geológico da encosta. Este mapeamento era realizado com o acompanhamento da perfuração dos furos executados na encosta para a aplicação dos grampos. Esse mapeamento foi objeto de pesquisa de uma dissertação de mestrado da COPPE/UFRJ (Gomes Silva, 2006). Os estudos realizados produziram modelos bidimensional e tridimensional, tanto para a encosta do Museu I (Lima, 2007), quanto para o Museu II.

Gomes Silva (2006) destaca que durante o mapeamento realizado na área de interesse, observou-se a presença de rochas gnáissicas de granulação fina a

média e coloração variando de cinza escura a vermelha. Também ocorre contato transicional entre o granada biotita gnaíse e o kinzigito. Os quartzitos constituem corpos descontínuos, intercalados nos gnaíses devido ao dobramento regional. São rochas de granulação fina a grossa, coloração cinza esbranquiçada a amarelada, fraturadas e de brilho vítreo.

Segundo Gomes Silva (2005), a área pesquisada está inserida na Unidade Morfoestrutural Superfícies Aplainadas nas Baixadas Litorâneas que representa os terrenos colinosos de baixa amplitude de relevo, localizados a leste da Baía de Guanabara e compreendidos entre as planícies costeiras e baixadas fluviomarinhas e a escarpa da Serra do Mar. A unidade é constituída por um relevo suave e uniforme de colinas amplas, baixas e niveladas, apresentando vertentes convexas, muito suaves, e topos arredondados. O relevo apresenta-se com padrão dendrítico e com uma densidade de drenagem baixa a média. Próximo à baixada da Guanabara, essa drenagem torna-se imperfeita, com padrão de canal divagante, devido ao lençol freático subaflorante.

A área de interesse está dentro de uma zona de falha característica de uma tectônica tangencial, que produziu vários estilos de dobras e foliações associadas, que evoluiu para uma tectônica direcional representada por extensas zonas de cisalhamento dúctil-rúptil de direção NE-SW que recortam o Estado do Rio de Janeiro. Na cidade do Rio de Janeiro e adjacências, é reconhecida a Zona de Cisalhamento Dúctil de Niterói, entre outras que afetam os diferentes gnaíses, milonitizando-os em espessas e extensas faixas de direção NE-SW a ENE-WSW. Embora estas faixas produzam uma marcante foliação tectônica, processos de silicificação observados em alguns trechos, enrijecem a rocha afetada pela deformação. A foliação das rochas na área de exposição é normalmente de ângulo (de cerca de 86°) e verticalizada ao longo do eixo do cinturão móvel, com mergulhos suaves para NW. A alteração das rochas com essa configuração geológico-estrutural produziu solos de coesão moderada e com várias discontinuidades, que facilitam o surgimento de processos erosivos e o colapso por tombamento, nas partes mais íngremes desse talude (Gomes Silva, 2006).

O sistema de discontinuidades na área é formado pelo bandeamento metamórfico (F1) e por quatro famílias de fraturas. A foliação (F1) é verticalizada, com mergulhos suaves para NW. As principais famílias de fraturas (F2 e F3) são ambas subverticais. Há ainda outras duas famílias de fraturas subhorizontais (F4 e F5) que aparecem ocasionalmente em alguns setores. A caracterização das discontinuidades existentes no maciço rochoso foi realizada de acordo com as

sugestões da ISRM (1978) para a descrição quantitativa das descontinuidades considerando a atitude, persistência, espaçamento, abertura, preenchimento, percolação e rugosidade (Tabela 22).

Tabela 22 – Caracterização das descontinuidades do maciço (Gomes Silva, 2006)

Características	Descontinuidade				
	Foliação F1	Fratura F1	Fratura F1	Fratura F1	Fratura F1
Direção/Mergulho (graus)	100/20	70/90	150/90	80/30	120/08
Espaçamento (cm)	<0,2	3	5	15	8,5
Persistência (m)	>20	7	8	5	8
Abertura (mm)	<0,5	0,3	0,5	0,1	0,2
Observações	Descontinuidades sem preenchimento e sem água				

O mapa geológico realizado por Gomes Silva (2006) pode ser observado na Figura 92. A alteração das rochas com essa configuração geológico-estrutural produziu solos de coesão moderada e com várias descontinuidades, que facilitam o surgimento de processos erosivos nas partes mais íngremes do talude.

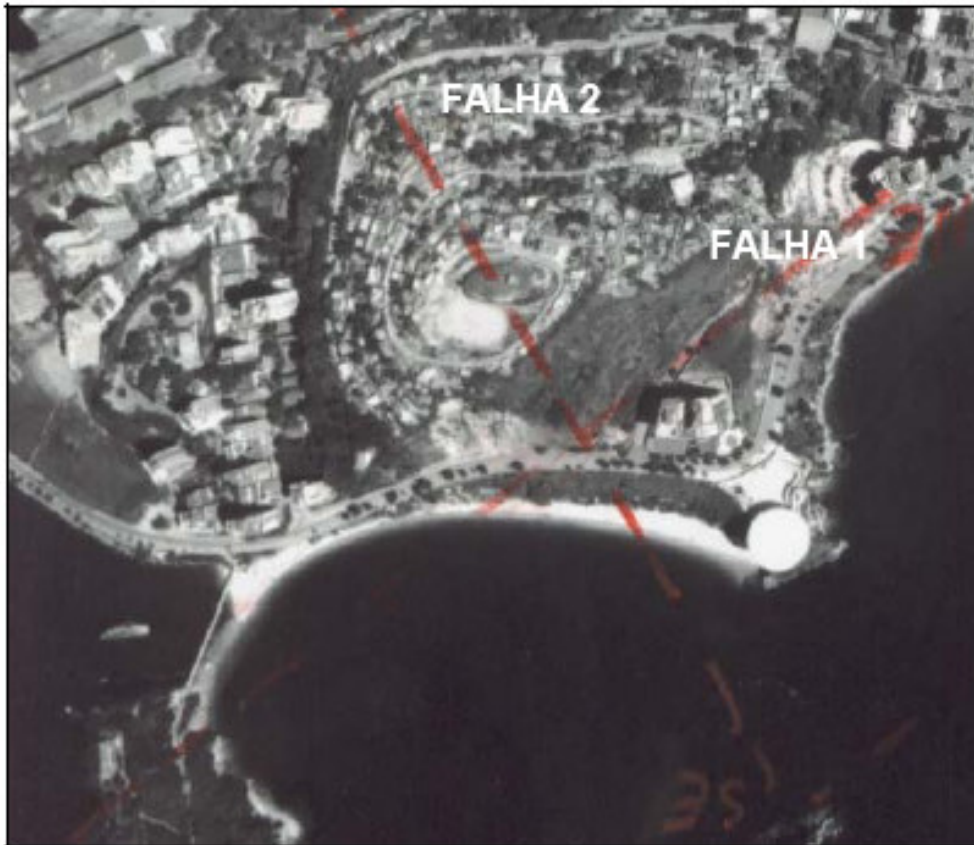


Figura 93 - Vista geral da área das obras Museu 1 e Museu 2 em foto aérea na escala 1:8.000 (Gomes Silva, 2006)

Gomes Silva (2006) reporta maiores detalhes e informações referentes aos estudos realizados na área. Os modelos apresentados são fundamentais pois fornecem um arranjo tridimensional dos materiais existentes na encosta. Na maioria das vezes os dados disponíveis são de ensaios de percussão que só fornecem informações pontuais. O mapeamento realizado levou em consideração os furos de sondagem executados, observação das feições geológicas durante os serviços de escavação e acompanhamento da perfuração para instalação dos grampos.

Dessa forma, foi possível propor um modelo geológico tridimensional para a encosta. Esse modelo disponibiliza os diferentes materiais que o grampo atravessa. Este aspecto é importante quando pretende-se analisar o comportamento do grampo em diferentes trechos, seja por monitoramento de carga ou por simulação numérica.

Gomes Silva (2006) propôs modelos para os quatro taludes grampeados da obra MUSEU II. Para cada um dos taludes estudados são fornecidos além da geometria as seguintes informações:

- Localização dos grampos permanentes instrumentados;
- Localização dos grampos de arrancamento instrumentados e não instrumentados;
- Localização dos demais grampos permanentes da obra;
- Materiais que compõem a encosta;
- Orientação do plano de fratura;
- Orientação magnética do talude;
- Contatos entre diferentes materiais da encosta.

A Figura 94 apresenta o modelo tridimensional para o Talude 01, onde estão instalados 02 grampos permanentes instrumentados (B4a e B4b) e 02 grampos utilizados em ensaios de arrancamento (AR00). Os grampos de interesse parecem estar inseridos no material definido como silte areno-argiloso. A descrição deste material está de acordo com os blocos BM1 e BM2 colhidos na região.

Para o talude 02 foi registrada a ocorrência de uma região denominada de área de cupinzeiro. A Figura 95 mostra o modelo para o segundo talude. A área de cupinzeiro foi encontrada durante os serviços de execução dos grampos da área. Observou-se que o consumo de nata de cimento foi superior ao dobro esperado para os grampos nesta área. Este fato foi investigado pela equipe presente no campo que examinou as áreas laterais ao talude e identificou a chamada área de cupinzeiro (Figura 96). A presença do cupinzeiro torna a distribuição de esforços nos grampos bem particular, com comportamentos diversos. É possível que o cupinzeiro prolongue-se para o talude 01 (Springer, 2006).

O talude 02 também apresenta 02 grampos permanentes (B5a e B5b) e 02 grampos utilizados nos ensaios de arrancamento (AR01). Os blocos BM03 e BM04 coletados na região dos grampos possuíam materiais condizentes com o que foi proposto pelo modelo de Gomes Silva (2006).

Os grampos de arrancamento parecem estar inseridos na área de cupinzeiro e novamente no material definido como silte areno-argiloso de coloração amarela. Por outro lado, para os grampos permanentes devem ocorrer os três materiais identificados ao longo da extensão do grampo. A presença dessa área de cupinzeiro deve ser levada em consideração nas análises uma vez que a mesma foi preenchida com calda de cimento, o que provavelmente conferiu um comportamento bastante rígido, quando comparado com os demais materiais da encosta.

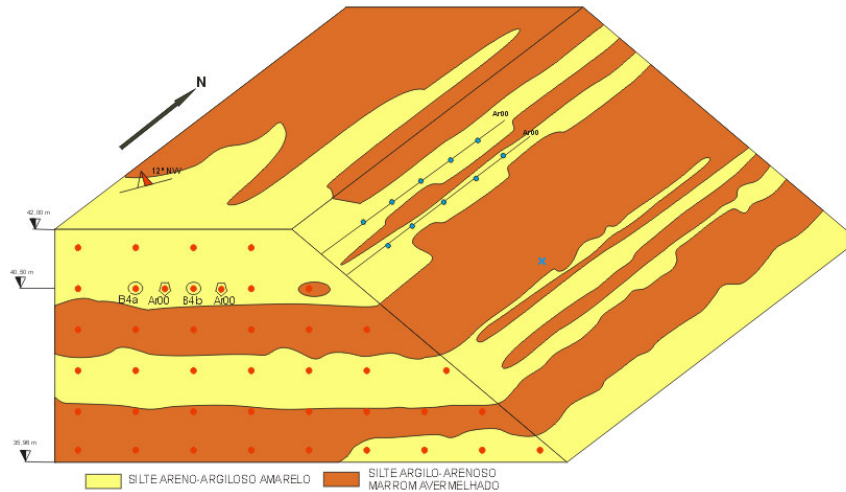


Figura 94 - Mapeamento Geológico para o Talude 1 (modificado de Gomes Silva, 2006).

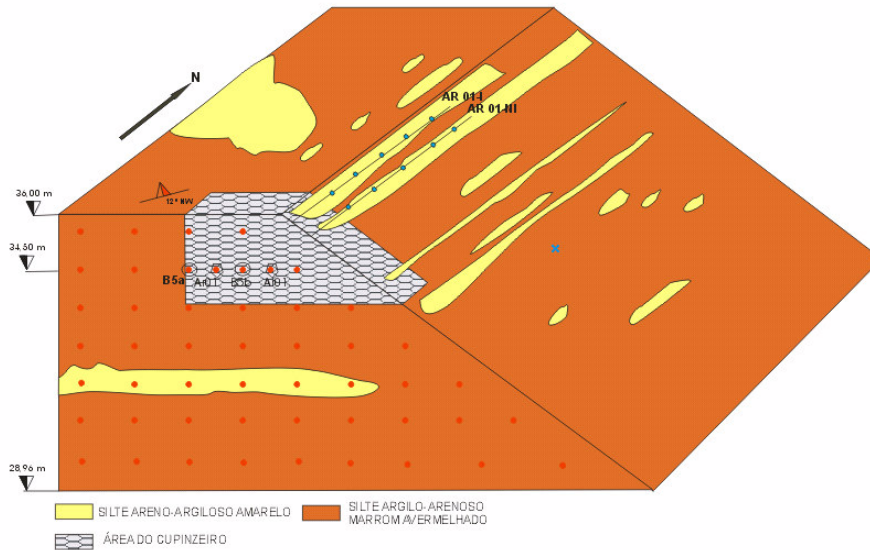


Figura 95 - Mapeamento Geológico para o Talude 2 (modificado de Gomes Silva, 2006).

Para os taludes 03 (Figura 97) e 04 (Figura 98) o material predominante é silte argilo-arenoso. Este material é de granulção mais grosseira do que o observado para os outros taludes. Os materiais dos blocos indeformados, coletados (BM05 a BM10) nestes taludes, possuem aspecto e granulometria similar. Além disto, eles confirmam as características do modelo geológico tridimensional proposto por Gomes Silva (2006). O talude 03 possui 04 grampos permanentes (B10a, B10b, B13a e B13b) e 04 grampos que foram utilizados nos ensaios de arrancamento (AR02 e AR03). O talude 04 possui 02 grampos permanentes (B15a e B15b) e 02 grampos que foram submetidos a ensaios de arrancamento.



Figura 96 - Área do cupinzeiro identificada no talude 02 (vista lateral do talude).

Os modelos tridimensionais propostos constituem informação fundamental para o estudo do comportamento dos grampos instrumentados, pois identificam os materiais no interior da massa de solo da encosta. Além disto, representam a grande variabilidade de materiais que pode dificultar o entendimento quanto ao comportamento do grampo.

Para a prática da engenharia não é comum a obtenção de um modelo geológico tridimensional. No entanto, neste projeto de pesquisa, a modelagem tridimensional corresponde à importante ferramenta quanto a definição do modelo de comportamento da obra.

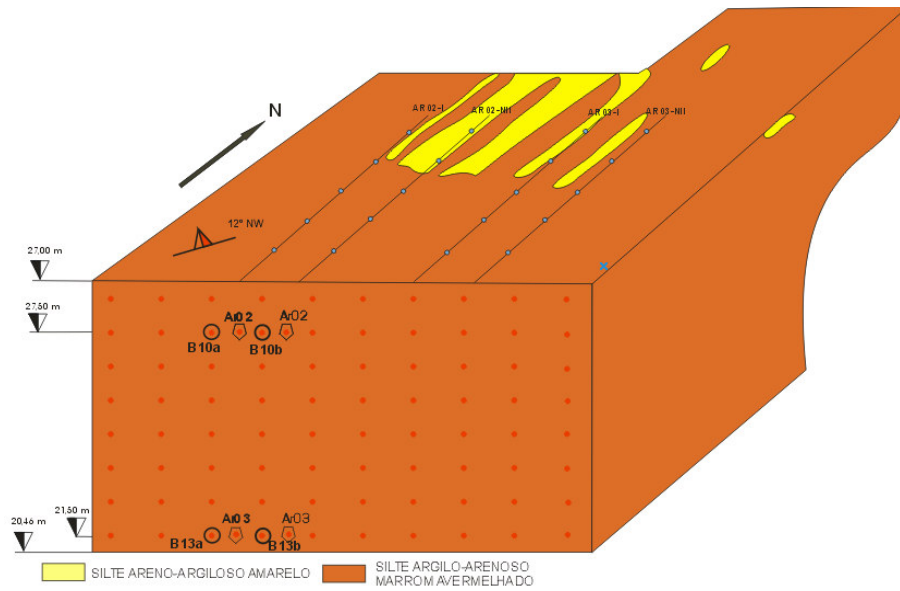


Figura 97 - Mapeamento Geológico para o Talude 03 (modificado de Gomes Silva, 2006).

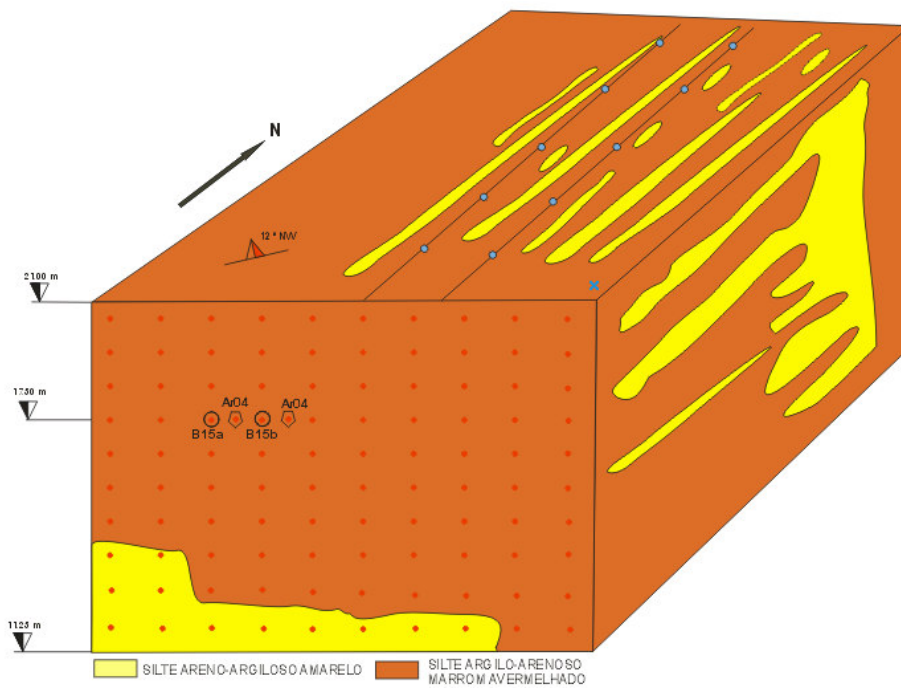


Figura 98 - Mapeamento Geológico para o Talude 04 (modificado de Gomes Silva, 2006).

5.3. Ensaios de Arrancamento

A resistência ao arrancamento de grampos é o parâmetro essencial para o projeto de estruturas de solo grampeado. Este parâmetro é frequentemente

estimado durante a fase de projeto (baseado na experiência do projetista) para posterior verificação, através de ensaios de arrancamento, durante a construção.

O ensaio de arrancamento consiste em se aplicar cargas de tração na barra de aço ancorada no terreno, através de macaco hidráulico. Para cada carga aplicada, registra-se o deslocamento de arrancamento da cabeça do grampo. Da curva *Deslocamento x Carga*, obtém-se a máxima *carga axial de tração cortante no grampo* do ensaio de arrancamento.

A resistência ao arrancamento $[q_s]$, obtida no ensaio, possui unidade de tensão e é definida como:

$$q_s = \frac{F_{\max}}{\pi D L_{\text{ancorado}}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

q_s : Resistência ao arrancamento mobilizada;

F_{\max} : Máxima carga axial de tração cortante no grampo;

D: Diâmetro da perfuração;

L_{ancorado} : Comprimento ancorado ou injetado do grampo.

O procedimento de instalação de grampos destinados aos ensaios de arrancamento (inclinação, perfuração, introdução no furo e injeção) deve ser exatamente o mesmo dos grampos de trabalho (permanentes) da construção, conforme recomendado por Clouterre (1991).

Baseado em resultados de pesquisa e estudos administrados pelo Projeto CLOUTERRE, os padrões utilizados para os ensaios de arrancamento podem ser executados com deslocamento controlado (velocidade constante) ou com força controlada.

Para as mesmas condições de solo, tanto o ensaio com controle de deslocamento quanto o ensaio com controle de força, devem levar ao mesmo resultado, ou seja, à mesma força máxima de arrancamento (Clouterre, 1991).

Através dos ensaios de arrancamento, é possível determinar a força máxima de arrancamento, a força residual e também o coeficiente k_β , correspondente à inclinação inicial da curva de deslocamento x força, conforme ilustrado na Figura 99 (Clouterre, 1991).

Nesta pesquisa foram executados ensaios de força controlada, que correspondem ao procedimento mais usual da prática brasileira.

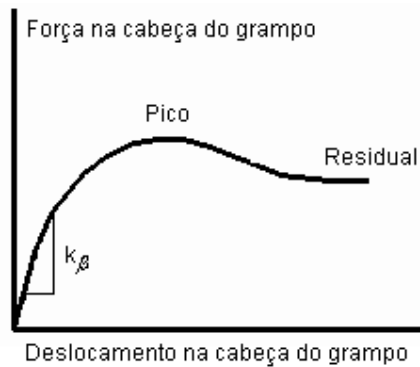


Figura 99 – Curva deslocamento x força de um ensaio de arrancamento (Clouterre, 1991).

Foram executados 10 ensaios de arrancamento ao longo do perfil da encosta, com intuito de se obter a resistência lateral no contato solo/nata de cimento ao longo dos grampos. Para se avaliar o comportamento e a distribuição do carregamento durante o ensaio, 5 grampos foram instrumentados com extensômetros elétricos ao longo do trecho injetado.

Para cada cota selecionada, executaram-se 2 ensaios, um com grampo instrumentado para se observar a distribuição dos carregamentos, e outro com grampo não instrumentado para verificar o valor da resistência ao arrancamento obtido no primeiro ensaio.

Desta forma, a campanha de ensaios de campo se dividiu em 5 grupos realizados em etapas distintas da escavação. Em cada grupo eram realizados os 2 ensaios de arrancamento instrumentado e não instrumentado. Os grupos de ensaios de arrancamento foram denominados de AR00, AR01, AR02, AR03 e AR04 e ocorreram nas cotas 38,5m, 34,5m, 27,5m, 21,5m e 17,5m, respectivamente (Figura 100).

Estes ensaios são objeto de duas outras pesquisas do Projeto de Solo Grampeado. Springer (2006) realizou ensaios de arrancamento no talude 01, isto é, na cota 38,5m (AR00). Proto Silva (2005) realizou os ensaios restantes. Maiores detalhes quanto a realização destes ensaios estão apresentados nos respectivos trabalhos citados acima.

Os grampos destinados aos ensaios de arrancamento foram inseridos entre os grampos permanentes de projeto. Os grampos de arrancamento em cada cota de ensaio eram separados entre si por uma distância de 3m.

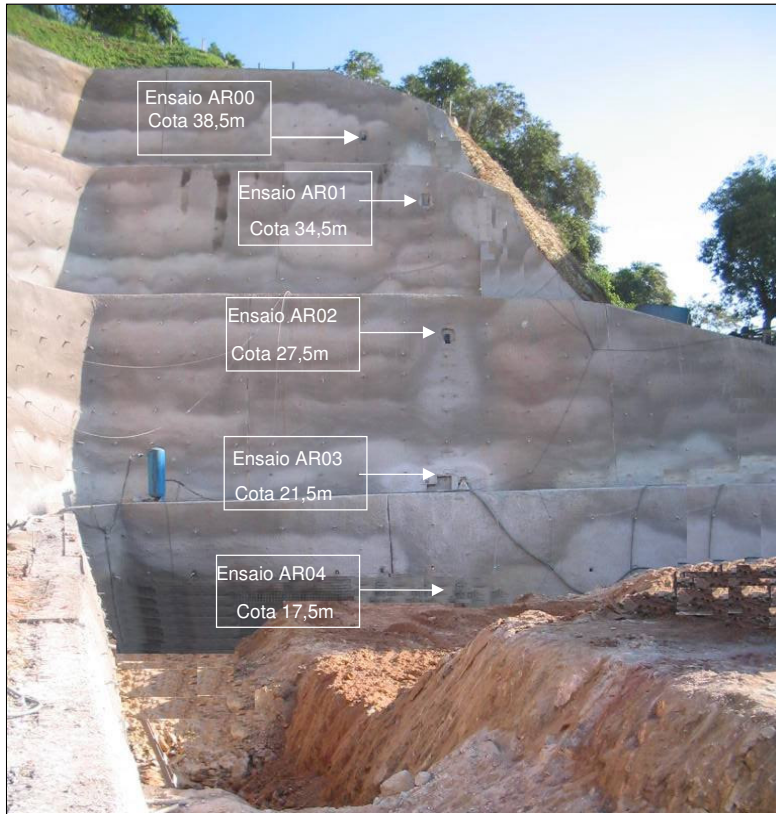


Figura 100 – Localização das cotas dos grupos de ensaios de arrancamento na escavação.

5.3.1. Procedimentos de ensaio

O esquema típico de montagem recomendado para o ensaio de arrancamento é apresentado na Figura 101. Observam-se, na ordem da seqüência, os seguintes componentes: (1) Placa de reação (aço ou concreto); (2) Grade de reação; (3) Macaco hidráulico; (4) Célula de carga; (5) Placa de reação; (6) Placa de referência; (7) Porca; e (8) Extensômetro fixado a suporte externo.

O eixo do macaco e o eixo do grampo devem estar alinhados. Para isto é usada uma grade de reação entre o macaco e a placa de reação (Lazart et al. 2003). É importante manter o extensômetro também alinhado ao eixo do grampo.

Os ensaios de arrancamento são realizados em grampos com um trecho inicial livre seguido de um trecho injetado. Deve-se garantir que não haja preenchimento de nata no trecho livre (caso dos tirantes, em que a barra fica protegida por um tubo plástico, graxa e envolto por nata). No caso dos grampos, deve-se utilizar um obturador de calda de cimento, para não permitir o

preenchimento do furo neste trecho. Caso haja preenchimento com nata, o trecho inicial do grampo estará sujeito aos efeitos do bulbo de compressão (provocado pelo sistema de carregamento), o que é indesejado.

O grampo é tracionado e a carga de tração deve ser monitorada por célula de carga (Figura 101) ou através da leitura manométrica do macaco hidráulico.

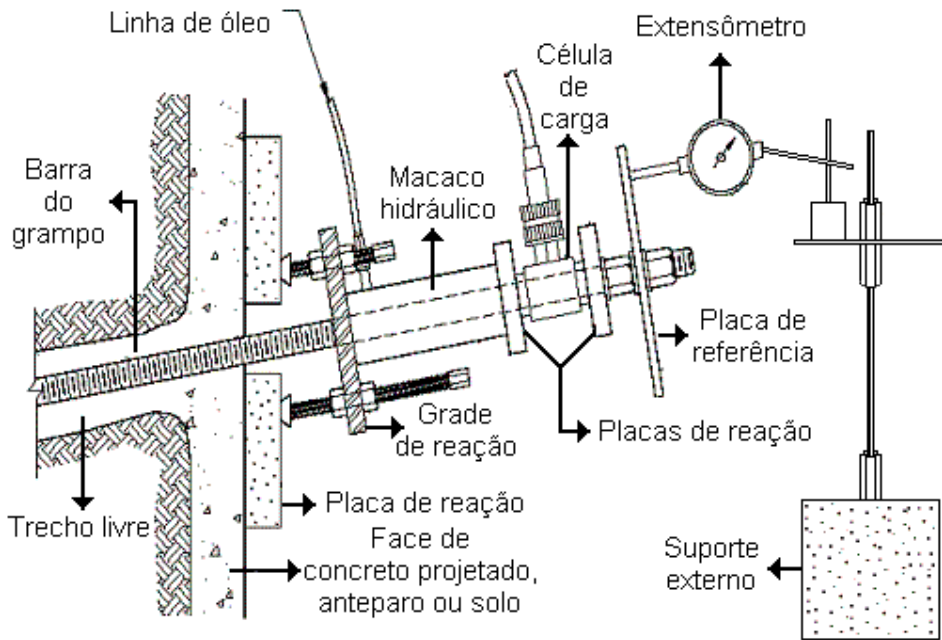


Figura 101 - Montagem do ensaio de arrancamento (Springer, 2006).

Os ensaios de arrancamento foram executados utilizando um macaco hidráulico com capacidade de 600kN e um extensômetro mecânico com curso de 20mm e precisão de 0,01mm, posicionado na placa de referência. As cargas foram medidas com uma célula de carga de capacidade de 200kN.

Partes dos grampos utilizados nos ensaios de arrancamento foram instrumentadas com extensômetros elétricos (*strain gages*) ao longo das barras de aço, a fim de se monitorar a distribuição das deformações e cargas ao longo dos grampos durante a execução dos ensaios.

O processo de instrumentação das barras seguiram as recomendações de Nunes et al. (2006). Cada barra foi instrumentada com 5 *strain gages* ao longo do trecho injetado distando de 50cm entre si, a partir do trecho livre de 1m (Figura 102).

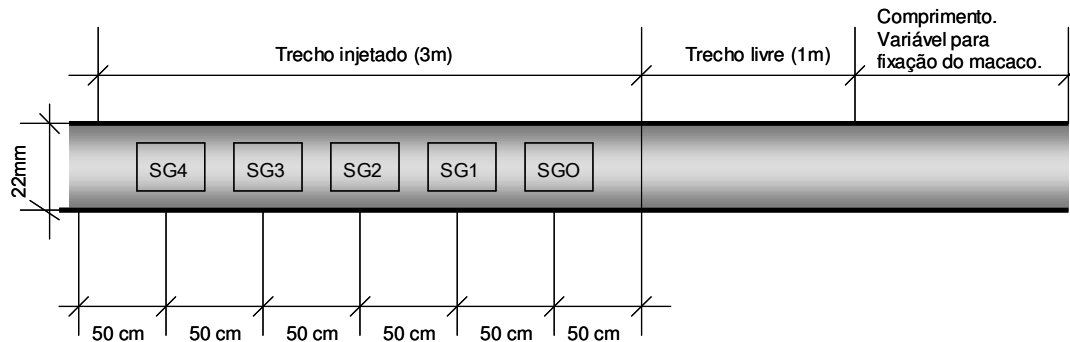


Figura 102 - Arranjo de instrumentação nos grampos de arrancamento (Proto Silva, 2005).

Foram utilizados extensômetros elétricos (*strain gages*) fabricados pela Excel sensores, específicos para aço com resistência de 120Ω , do tipo PA-06-125AA-120-LEN. Apresentam 6,35mm de comprimento e 3,18mm de largura. Estas dimensões foram escolhidas de forma a minimizar a área da barra de aço necessária para a colagem do *strain gage*. Os *strain gages* apresentam um fator de sensibilidade (*gage factor*) de 2,1, conforme informação do fabricante. Maiores detalhes quanto a instrumentação e preparo das barras de arrancamento são apresentados por Proto Silva (2005) e Springer (2006).

Os ensaios foram executados em estágios crescentes, com uma carga inicial de 20kN (pré-carga ou carga de aperto), carga necessária para acomodação do conjunto de placas, macaco hidráulico, célula de carga e extensômetro. Os incrementos de carga foram de 8,5kN e as medidas de deslocamentos na cabeça do grampo eram realizadas ao final de cada estágio de carregamento, até a sua estabilização.

Nos grampos instrumentados o intervalo de tempo entre os estágios eram mais longos, permitindo uma maior aquisição de dados. Este período era controlado pelo operador do sistema, através do monitoramento da curva tempo versus variação das leituras, até a estabilização dos extensômetros elétricos instalados nas barras.

Nos ensaios de arrancamento os grampos eram levados até a ruptura. Após este estágio, a carga era mantida constante para se determinar a ocorrência de um patamar de resistência residual (pós-pico). Em alguns casos, os ensaios foram interrompidos por limitações da célula de carga (200kN).

Detalhes quanto a calibração dos grampos podem ser obtidos nos trabalhos de Springer (2006) e Proto Silva (2005).

5.3.2. Resultados dos Ensaios AR00

Os ensaios AR00a e AR00b foram realizados por Springer (2006) na cota 38,5m do talude 01. Estes ensaios serão aqui denominados de AR00a e AR00b.

O solo correspondente à região dos ensaios AR00a e AR00b é um solo residual maduro (silte areno-argiloso amarelo), tal como foi apresentado no modelo geológico. Apesar do grampo AR00b ser re-injetado, apresentou resistência ao arrancamento de 180kN/m², inferior à do grampo AR00a igual a 240kN/m². Este fato pode ser explicado pela presença do cupinzeiro de grandes dimensões, já descrito anteriormente.

Provavelmente, o grampo AR00b foi instalado em área afetada pelo cupinzeiro, a qual não foi identificada no modelo geológico-geotécnico do talude 01 (Figura 94). Entretanto, observa-se na Figura 95 que o cupinzeiro se situa no topo do talude 02 subjacente ao talude 01, e portanto, não se deve desconsiderar a influência dos grandes vazios na região do grampo AR00b. Em ambos os ensaios, a placa de reação de aço penetrou no solo, gerando leituras negativas de deslocamento da cabeça do grampo.

A Figura 103 e a Figura 104 apresentam o conjunto de resultados referentes aos ensaios de arrancamento AR00 localizados na cota 38,5m. É possível observar para ambos os casos uma curva típica que caracteriza o arrancamento no ensaio.

O ensaio AR00a é caracterizado por 04 trechos distintos: um de ajuste e três arrancamento. As fases de carregamento são identificadas por comportamentos lineares para um mesmo intervalo. Para cada um desses trechos foi traçada uma reta de ajuste (Figura 103). A declividade desta reta define o coeficiente k_{β} . O mesmo procedimento aqui descrito foi utilizado para os outros ensaios de arrancamento. Os valores obtidos de q_s foram de 240 e 124 kPa para as condições de pico e residual, respectivamente.

O ensaio AR00b também apresentou os mesmos trechos descritos anteriormente (Figura 104). O mesmo procedimento foi utilizado para analisar o ensaio. Os valores de q_s foram iguais a de 180 e 164kPa pico e residual).

A Figura 105 e a Figura 106 apresentam a distribuição de carga ao longo do comprimento do grampo. Em ambos os ensaios, a distribuição é linear, porém é decrescente da cabeça em direção à parte mais interna.

A presença do cupinzeiro na área torna estes ensaios bem particulares, com comportamentos diversos. No grampo AR00a (Figura 105) são definidas duas inclinações principais para cada etapa de carregamento. No grampo AR00b

(Figura 106), há uma queda de carga acentuada entre o valor medido pela célula de carga e o registrado no último extensômetro. A distribuição de cargas ao longo da barra está de acordo com o descrito por Clouterre (2001). É possível afirmar que grande parte dos esforços na barra ocorre na metade inicial da barra.

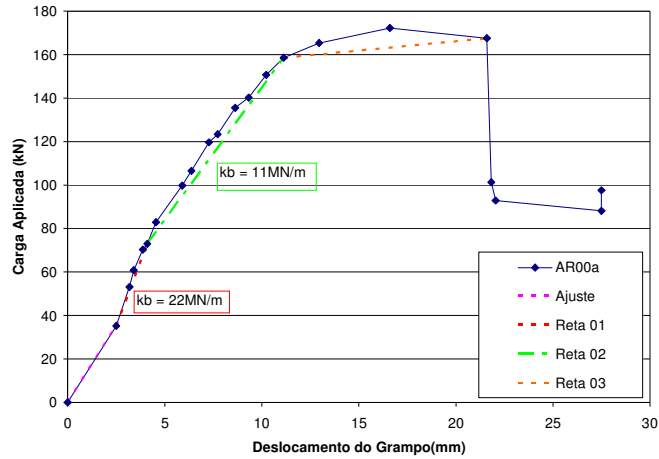


Figura 103 – Curva Carga x Deslocamento da cabeça do grampo do ensaio de arrancamento AR00a (Springer, 2006).

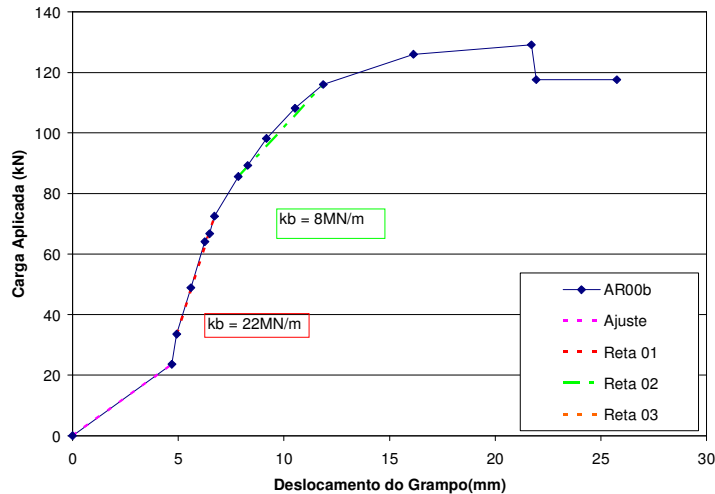


Figura 104 – Curva Carga x Deslocamento da cabeça do grampo do ensaio de arrancamento AR00b (Springer, 2006).

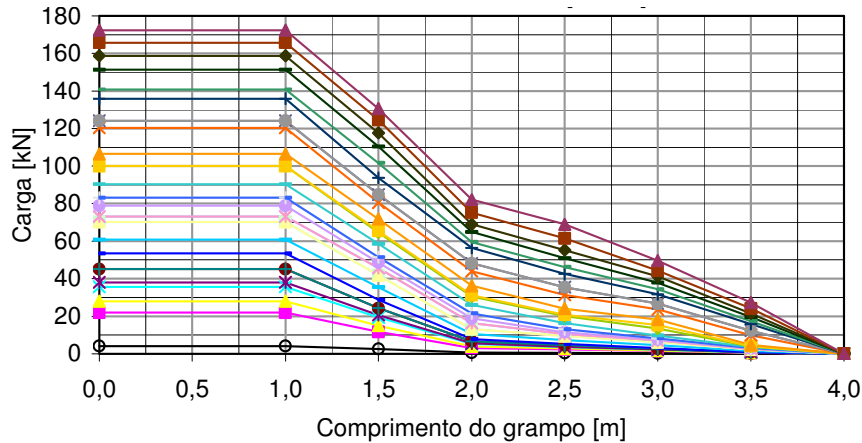


Figura 105 – Distribuição de carga ao longo do grampo do ensaio AR00a (Springer, 2006).

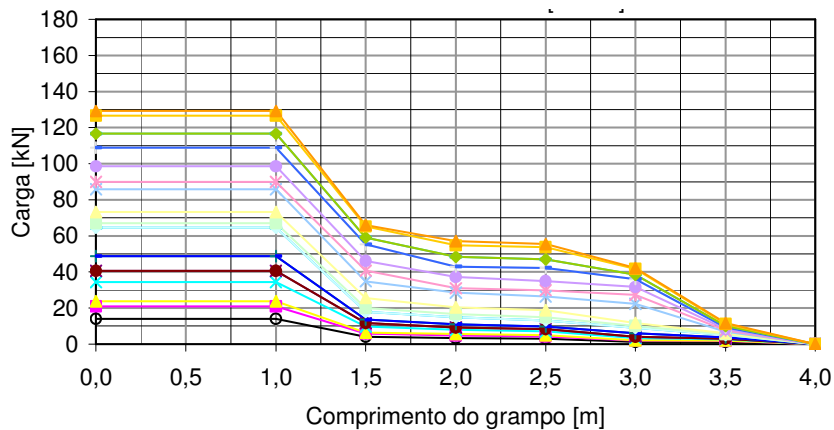


Figura 106 – Distribuição de carga ao longo do grampo do ensaio AR00b (Springer, 2006).

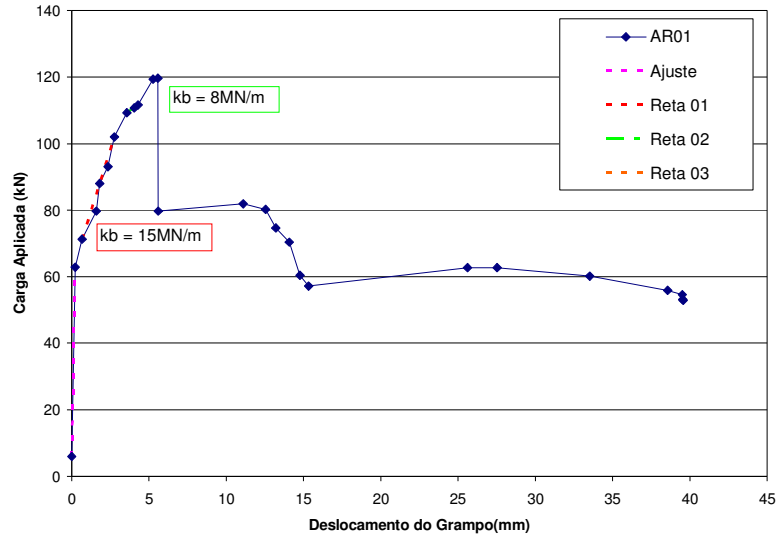
5.3.3. Resultados dos Ensaio AR01

Os ensaios AR01a e AR01b foram realizados por Proto Silva (2005) na cota 35m (talude 02) e seus resultados são apresentados na Figura 107 e a Figura 108.

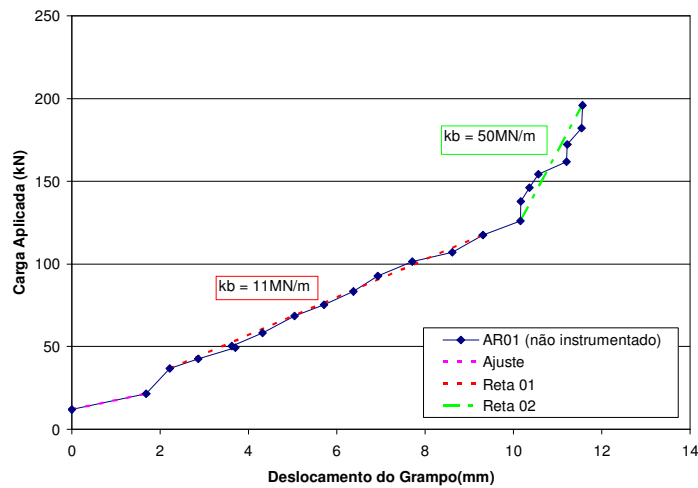
Observa-se da Figura 107 que as cargas máximas atingidas são iguais a 120 e 198,2 kN para o grampo instrumentado e não instrumentado, respectivamente. O mesmo tratamento aplicado para os ensaios AR00 para obtenção do coeficiente k_{β} foi utilizado para a análise dos resultados do ensaio de arrancamento AR01.

A distribuição de cargas ao longo do grampo instrumentado é apresentada na Figura 108. É possível observar que grande parte da carga é mobilizada no trecho inicial da barra, isto é, a primeira parte da barra desempenha papel

fundamental quanto à resistência ao arrancamento de um grampo. A declividade das curvas mostra uma tendência de comportamento mais rígido próximo à condição de ruptura. O formato das curvas obtidas é compatível com o reportado por outros autores (Clouterre, 1991).



(a) grampo instrumentado



(b) grampo não instrumentado

Figura 107 – Curvas Carga x Deslocamento da cabeça do grampo dos ensaios de arrancamento AR01: (a) grampo instrumentado; (b) grampo não instrumentado.

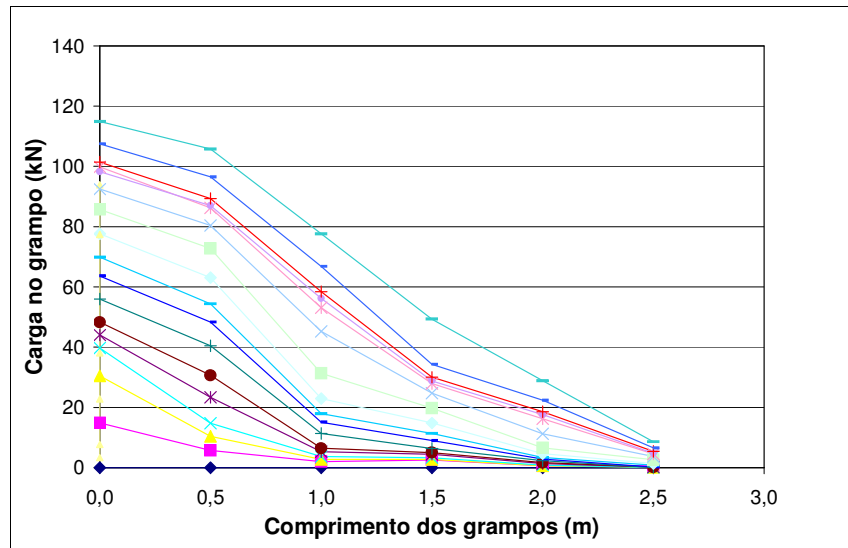


Figura 108 - Distribuição de carga ao longo do grampo instrumentado do ensaio AR01.

Na Figura 107 nota-se uma grande diferença na carga de arrancamento do ensaio instrumentado (120 kN) e a carga máxima aplicada no grampo não instrumentado (198,2kN). Atribui-se este fato à ocorrência de um grande nicho de cupins na zona do ensaio não instrumentado. O cupinzeiro foi detectado durante a execução da obra e, por recomendação do projetista, foi injetada nata de cimento em toda a zona afetada para preenchimento dos vazios. A injeção de nata pode ter gerado uma zona de alta resistência na região deste grampo. Isto explicaria a maior resistência ao arrancamento do grampo não instrumentado em relação ao instrumentado. Vale lembrar que os grampos de arrancamento em todas as cotas distam entre si de 3m.

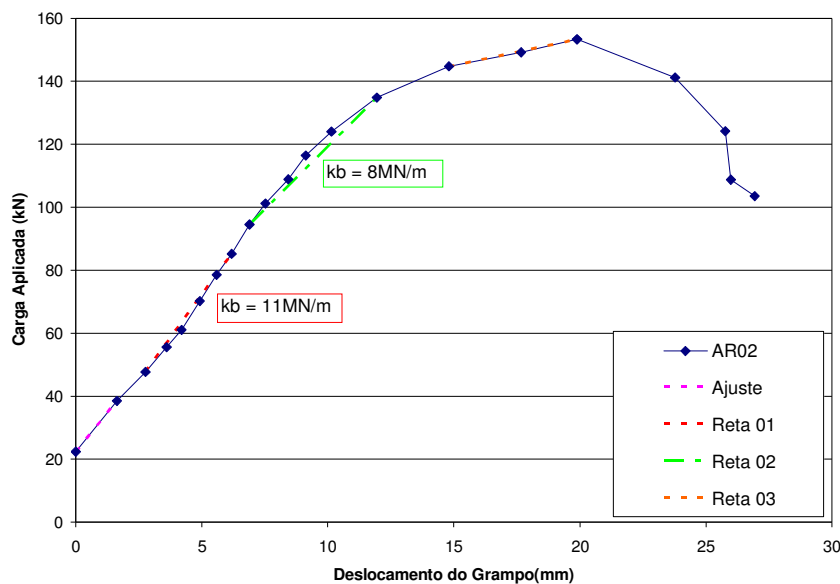
De fato, o grampo não instrumentado AR01 não atingiu a ruptura (Figura 107b). A carga aplicada alcançou valores próximos do limite de trabalho da célula de carga e da barra de aço, impedindo a determinação da real resistência ao arrancamento deste ensaio. Ao contrário do grampo instrumentado (Figura 107a), cuja resistência ao arrancamento é igual a 120 kPa.

5.3.4. Resultados dos Ensaio AR02

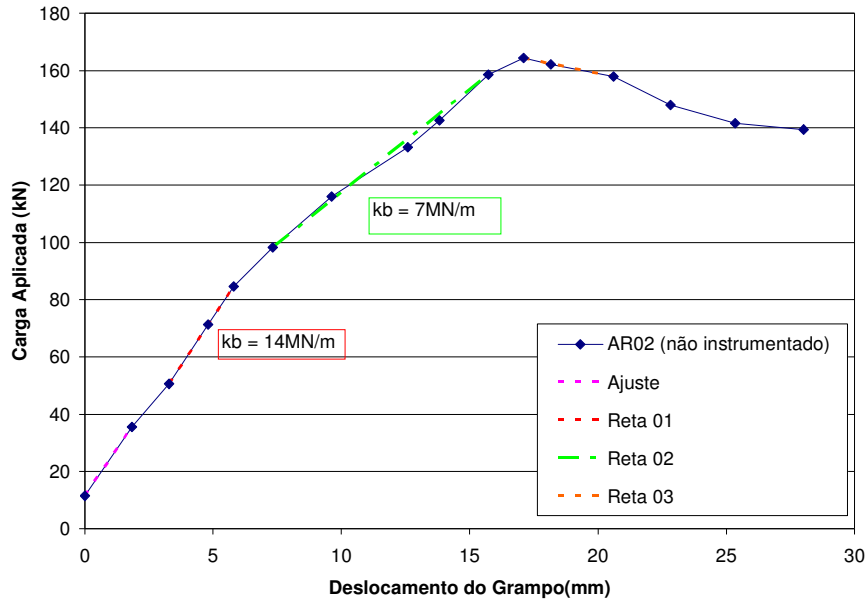
Os ensaios denominados de AR02 foram executados na cota 27,5m. Foram executados ensaios com barra instrumentada e não instrumentada. A carga de ruptura observada para os dois ensaios foi equivalente: 150 kN (instrumentada) e 168 kN (não instrumentada). Os valores de q_s obtidos foram

de 216 kPa para o grampo instrumentado e 249 kPa para o grampo não instrumentado. Outro aspecto que foi observado foi a carga residual, isto é, a carga após a ruptura. O valor residual de q_s para esta condição foi de 147 kPa (instrumentado) e 200 kPa (não instrumentado).

A Figura 109 mostra o resultado do ensaio para o grampo instrumentado e não instrumentado. Na mesma figura é possível observar os valores do parâmetro k_β para os ensaios. A Figura 110 apresenta a distribuição de cargas nos extensômetros ao longo da barra para o grampo instrumentado. Admite-se ter ocorrido uma falha na injeção deste grampo, ou grande retração da nata, originando uma zona com pouco contato solo/nata de cimento. Assim, a transmissão de cargas se dá de forma constante neste trecho, tendo um comportamento similar ao do trecho livre. Isto poderia justificar a menor resistência lateral do grampo instrumentado quando comparada ao do grampo não-instrumentado.



(a) grampo instrumentado



(b) grampo não instrumentado

Figura 109 – Curvas Carga x Deslocamento da cabeça do grampo dos ensaios de arrancamento AR02: (a) grampo instrumentado; (b) grampo não instrumentado.

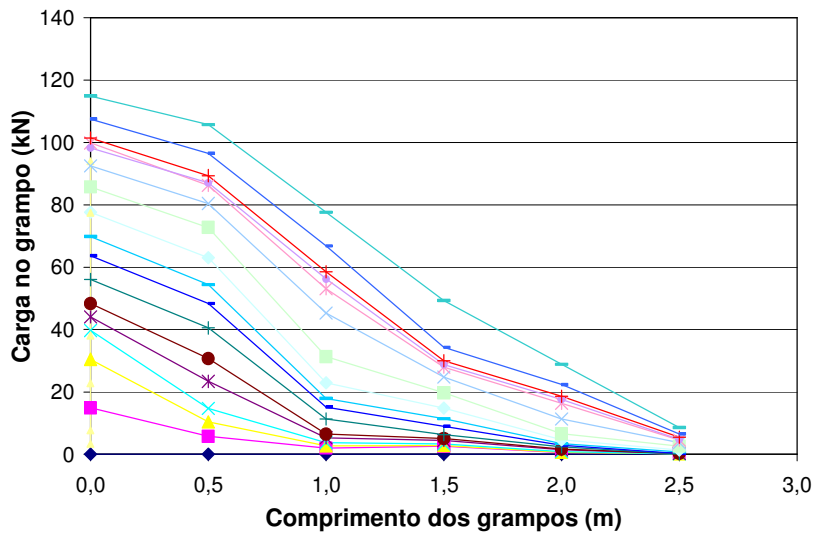


Figura 110 - Distribuição de carga ao longo do grampo instrumentado do ensaio AR02.

5.3.5. Resultados dos Ensaios AR03

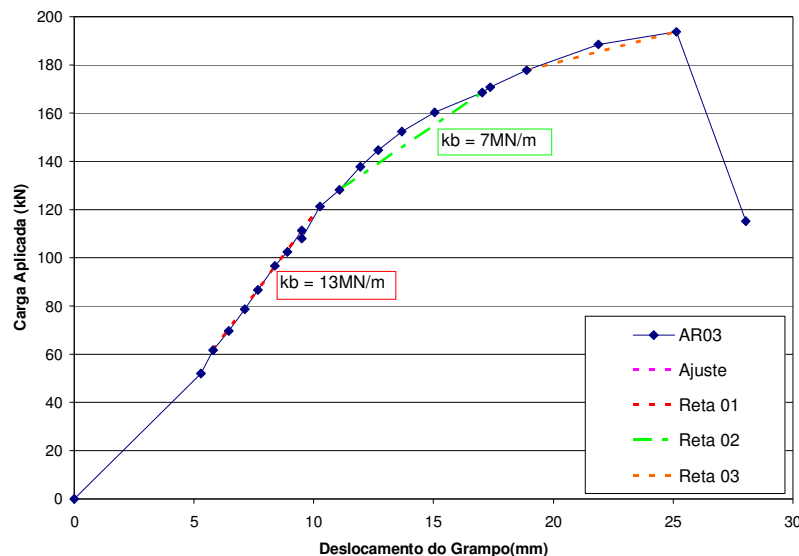
A Figura 111 e a Figura 112 apresentam os resultados referentes aos ensaios AR03 realizados na cota 21,5m. A Figura 111 mostra a evolução de

carga na célula de carga com o deslocamento de um extensômetro posicionado na extremidade externa do grampo.

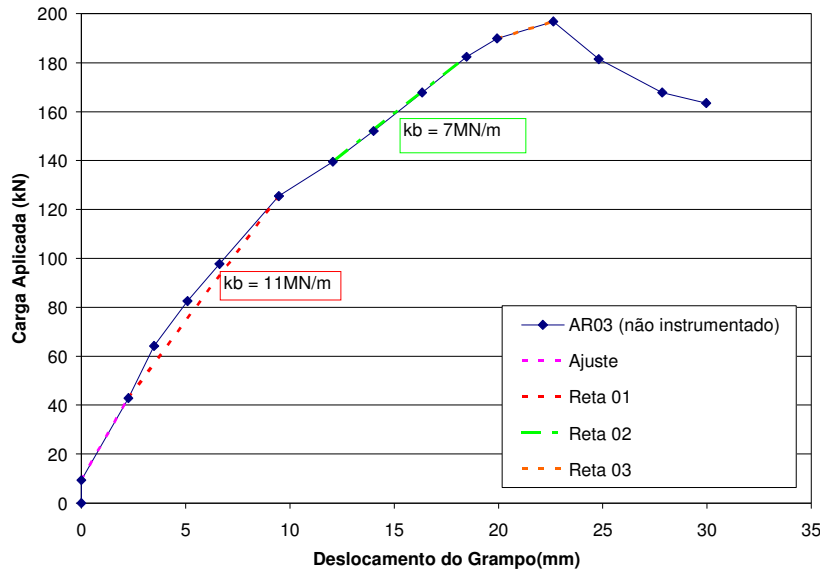
Observa-se que a carga máxima para o grampo instrumentado AR03 é de 190kN, com resistência ao arrancamento igual a 269kPa. Similarmente, obtém-se uma carga máxima de 198kN e uma resistência ao arrancamento de 280kPa para o grampo não instrumentado AR03.

Nos ensaios AR03, nota-se a similaridade de valores da resistência do grampo instrumentado e não instrumentado. Quando comparadas, as cargas de ruptura apresentam uma variação mínima e o comportamento carga versus deslocamento dos grampos foi semelhante para ambos os casos.

Observando-se a distribuição de cargas ao longo do grampo instrumentado AR03 (Figura 112), nota-se que, para os primeiros estágios de carregamento, as cargas foram semelhantes nos *strain gages* localizados a 0,5m e 1m de comprimento injetado. Pode-se atribuir este comportamento aos mesmos motivos do ensaio do grampo AR02. Outra dificuldade foi encontrada neste ensaio. Quando a carga atingiu o nível de 125kN, foi perdido o contato do SG 0 (a 0,5m). Como o circuito de alimentação do sinal elétrico dos *strain gages* é em série, houve perda do zero de referência de carregamento dos outros extensômetros elétricos. Assim, não se conseguiu monitorar a distribuição de carga ao longo dos grampos para os estágios de carga subseqüentes.



(a) grampo instrumentado



(b) grampo não instrumentado

Figura 111 – Curvas Carga x Deslocamento da cabeça do grampo dos ensaios de arrancamento AR03: (a) grampo instrumentado; (b) grampo não instrumentado.

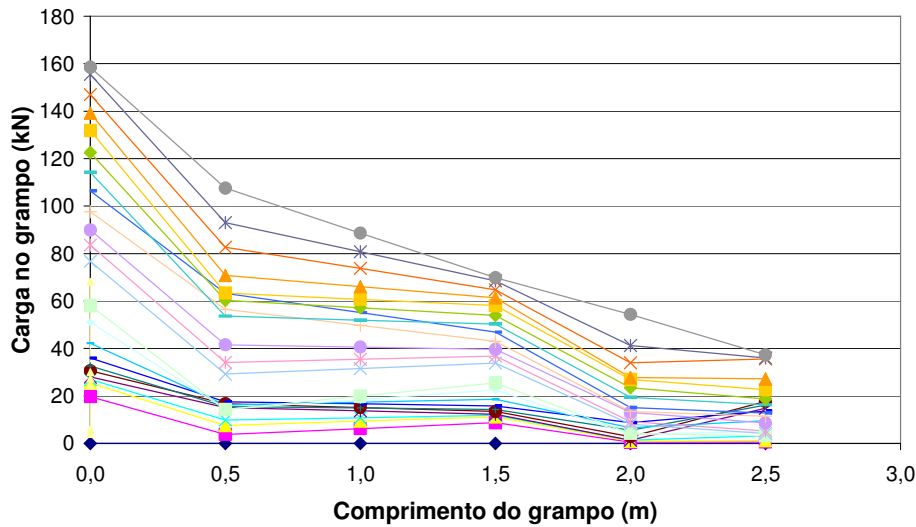
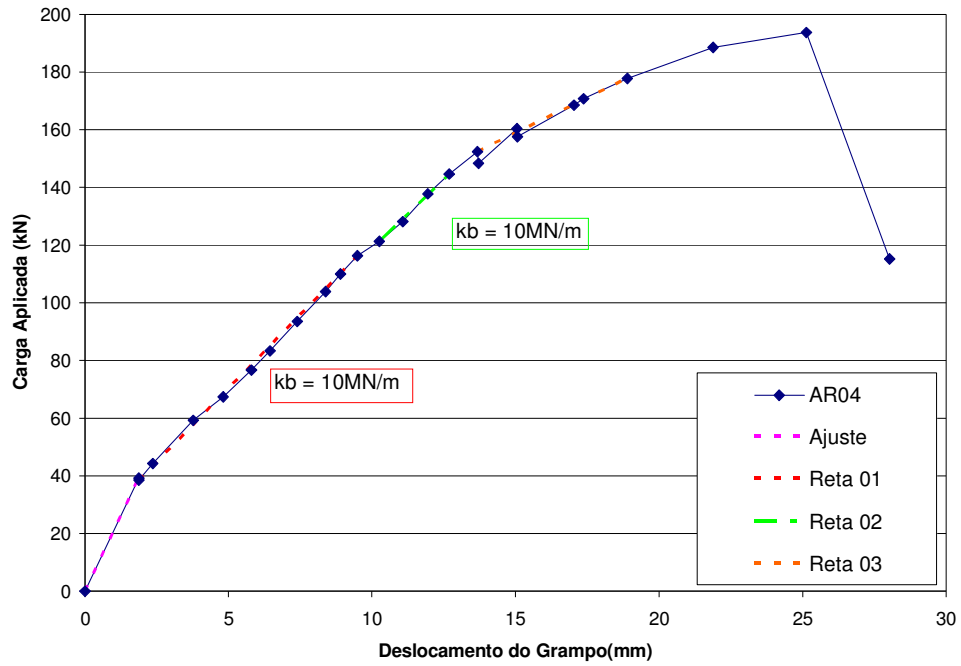


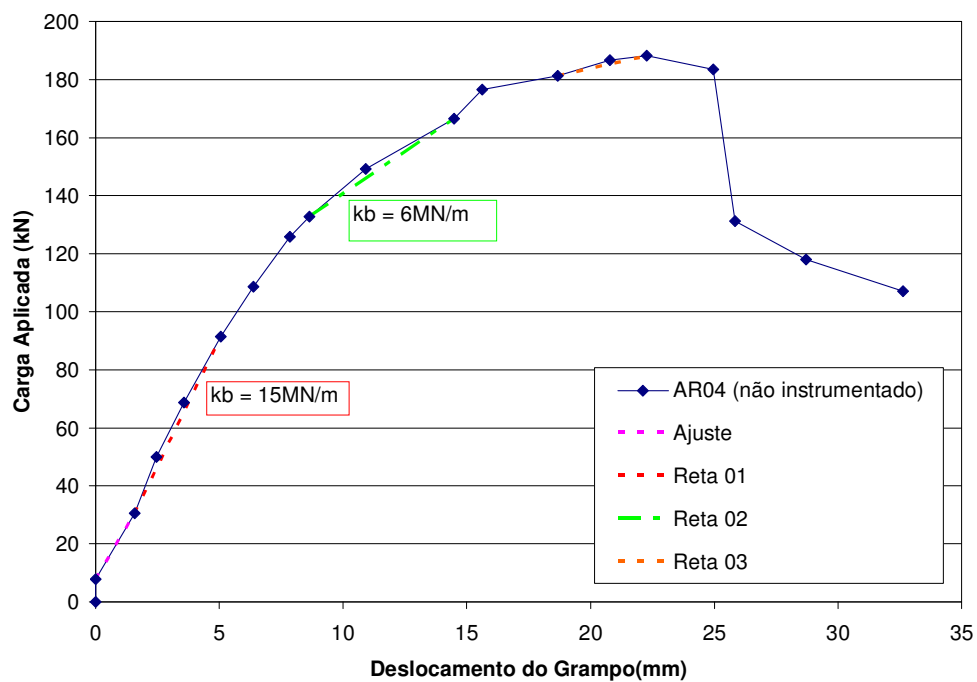
Figura 112 - Distribuição de carga ao longo do grampo instrumentado do ensaio AR03.

5.3.6. Resultado dos Ensaio AR04

Foram realizados 02 ensaios na cota 17,5m. O primeiro com grampo instrumentado e o segundo com um grampo sem instrumentação. A Figura 113 e a Figura 114 apresentam os resultados referentes aos ensaios de arrancamento AR04.



(a) grampo instrumentado



(b) grampo não instrumentado

Figura 113 – Curvas Carga x Deslocamento da cabeça dos grampos dos ensaios de arrancamento da etapa AR04: (a) grampo instrumentado; (b) grampo não instrumentado.

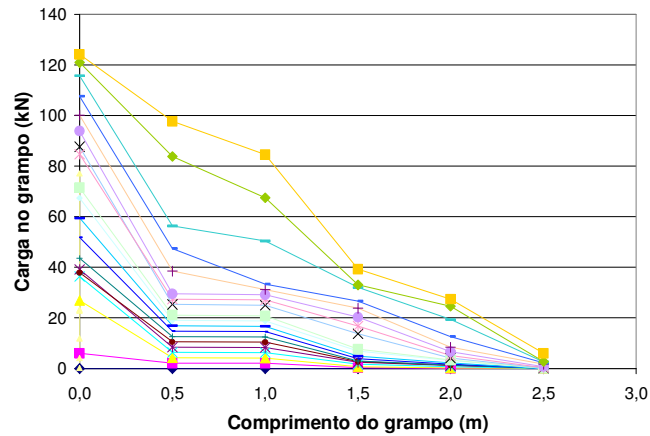


Figura 114 - Distribuição de carga ao longo do grampo instrumentado do ensaio AR04.

Os ensaios AR04 mostram comportamentos mecânicos semelhantes entre si. As cargas de ruptura e resistências ao arrancamento são iguais a 182kN e 258kPa para o grampo instrumentado e, 185kN e 263kPa para o grampo não instrumentado.

Na Figura 114 pode-se observar a distribuição de carga do grampo AR04 semelhante a apresentada por Clouterre (1991). Neste ensaio, o SG 4 (na posição de 2,5m) não funcionou durante a execução do ensaio. Este fato pode ser atribuído a algum problema durante o processo de instalação ou transporte do grampo até o local da obra, pois, quando realizada a calibração prévia da barra, observou-se que o *strain gage* funcionava adequadamente.

A Tabela 23 resume os 10 ensaios de arrancamento realizados.

Tabela 23 - Resumo dos Resultados dos Ensaios de Arrancamento

Ensaio	Cota (m)	$F_{Ruptura}$ (kN)	$F_{Residual}$ (kN)	$q_s Pico$ (kPa)	$q_s Residual$ (kPa)	$k\beta_1$	$k\beta_2$
AR00a	38,5	172	88	240	124	22	11
		129	117	180	164	22	8
AR01	34,5	119	55	166	85	15	8
		SR	SR	SR	SR	11	-
AR02	27,5	150	103	216	147	11	8
		168	140	249	200	14	7
AR03	21,5	190	115	269	164	13	7
		198	163	280	233	11	7
AR04	17,5	182	115	258	164	10	10
		185	107	263	153	15	6

SR: Sem Ruptura

A análise dos dados apresentados na Tabela 23 mostra uma semelhança entre as resistências obtidas nos ensaios AR02, AR03 e AR04. É importante ressaltar que os ensaios de caracterização das amostras respectivas a cada cota de ensaio (Capítulo 4) indicam que estes solos são classificados como uma areia argilosa, enquanto que o material correspondente aos ensaios AR00 e AR01 é classificado como uma argila arenosa. Para a região dos grampos AR00 e AR01 deve-se ressaltar a ocorrência do cupinzeiro já reportada anteriormente

Observa-se um nítido aumento da resistência ao arrancamento (q_s) quando comparados os ensaios AR01 e AR02. Este aumento pode ser atribuído à variação do tipo de solo apresentado nestas cotas de escavação.

Quando comparados os ensaios AR02, AR03 e AR04, pode-se notar uma diferença não desprezível entre os valores de resistência ao arrancamento. Isto pode ser justificado pela maior resistência e menor deformabilidade da areia argilosa nas diferentes profundidades. Este comportamento é típico para perfis de intemperismo. A variação da resistência ao arrancamento parece ser mais dependente do tipo de material do que da profundidade a qual o grampo foi instalado. Dessa forma, sugere-se que a natureza do material seja mais significativa para quantificar q_s do que a própria tensão normal atuante sobre o grampo.

Outra observação importante refere-se à comparação entre os valores de resistência ao arrancamento dos grampos instrumentado e não instrumentado na mesma cota. É possível observar em todos os ensaios (exceto o AR01) que os valores de resistência ao arrancamento dos grampos não instrumentados são um pouco superiores quando comparados aos instrumentados. Isto sugere uma pequena interferência da instrumentação das barras no valor da carga portante dos grampos (Proto Silva, 2005). De fato, a área da barra de aço em contacto com a nata de cimento é reduzida pela presença do cabo de proteção dos fios de ligação dos *strain gages*. Este cabo foi selecionado atentando-se para ocupar a menor área possível da barra e possibilitar a passagem de todos os fios. O efeito de redução da área de contacto cabo-barra foi considerado desprezível. Entretanto, os resultados dos ensaios sugerem uma possível influência.

Considerando os resultados dos ensaios de arrancamento executados, obtém-se dois valores de resistência ao arrancamento em função das características dos solos. O primeiro corresponde à região de ensaios AR00 e AR01, onde o perfil de alteração do talude mostra um solo residual maduro, classificado como uma argila arenosa, conforme os ensaios de caracterização (Capítulo 4) e também pelo modelo tridimensional apresentado. O segundo

corresponde ao solo residual jovem da região de ensaios AR02, AR03 e AR04, classificado como uma areia argilosa.

A Tabela 24 resume os resultados da resistência ao arrancamento em função das características dos materiais. É possível notar que a diferença entre a resistência de pico e residual é sempre superior a 50%. Tal fato demonstra o comportamento frágil nas rupturas e/ou arrancamento de grampos.

Tabela 24 - Valores representativos de atrito lateral

<i>Cota (m)</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Tipo de solo</i>	<i>q_s Pico (kPa)</i>	<i>q_s Residual (kPa)</i>	<i>Diferença (%)</i>
38,5	AR00	Argila arenosa	210	144	69
34,5	AR01		166	85	51
27,5	AR02		227	174	76
21,5	AR03	Areia argilosa	274	199	72
17,5	AR04		260	159	61

Proto Silva (2005) estimou as tensões atuantes nos grampos dos ensaios AR01 a AR04. A mesma técnica aplicada pelo autor foi utilizada para a determinação das tensões para AR00. O valor médio da tensão normal atuante no grampo, a qual é variável por condições geométricas do maciço, foi determinada pela média ponderada entre os valores pontuais de σ_n ao longo dos grampos.

A Tabela 25 apresenta o valor destas tensões normais médias atuantes nos grampos nas cotas de ensaio, bem como o valor da resistência ao arrancamento determinada anteriormente. A Figura 115 ilustra a condição de carregamento nos grampos adotada.

Tabela 25 – Tensão normal atuante nos grampos (modificada de Proto Silva, 2005)

<i>Ensaio</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>Tensão normal (kPa)</i>	<i>Resistência ao arrancamento (kPa)</i>
AR00	38,5	38,4	210
AR01	34,5	75,1	166
AR02	27,5	120,3	227
AR03	21,5	223,0	275
AR04	17,5	188,3	260

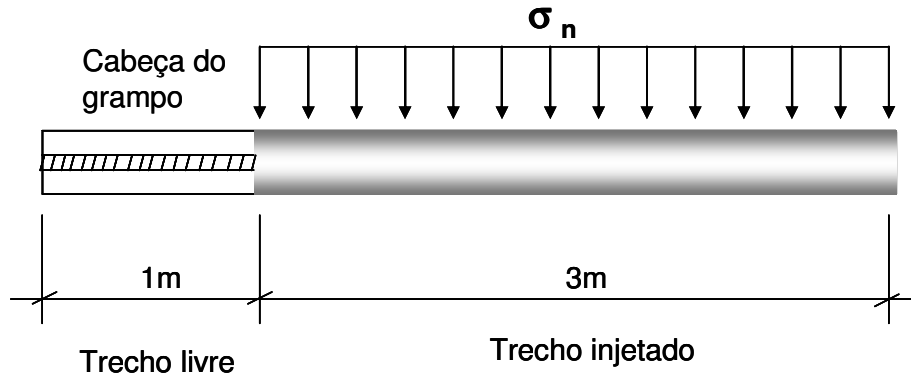


Figura 115 – Distribuição esquemática da tensão normal nos grampos (Proto Silva, 2005)

5.4. Considerações Finais

As investigações *in situ* realizadas foram capazes de fornecer informações fundamentais quanto às condições de campo:

- Os valores obtidos para a investigação à percussão tipo N_{SPT} podem ser utilizados para uma estimativa inicial de q_s , desde que o valor obtido pela correlação proposta seja minorado;
- O mapeamento geológico tridimensional mostrou-se como ferramenta fundamental para a determinação do tipo de solo na encosta ao longo do grampo, definição dos contatos entre solos de natureza diferente, identificação de planos de fraqueza preferencial (falhas) e complementação das informações colhidas em campo;
- Os ensaios de arrancamento constituem-se em ferramenta essencial para a determinação do valor de q_s . A execução de ensaios dessa natureza é fundamental para o controle técnico da obra. Devem ser previstos em intervalos de altura da obra pré-estabelecidos ou quando da alteração do tipo de material da encosta. Os ensaios permitem a determinação do valor de q_s e do parâmetro k_β .

A Tabela 26 resume os dados obtidos ao longo da campanha de investigação de campo. Nesta tabela estão apresentadas as informações referentes aos ensaios de arrancamento, ensaios a percussão e mapeamento geológico.

Tabela 26 - Resumo dos dados obtidos na campanha de investigação de campo

Ensaio	Ensaio de Arrancamento					SPT		Mapeamento
	Cota (m)	q_s Pico Médio (kPa)	q_s Residual Médio (kPa)	$k_{\beta 1}$ (Médio)	$k_{\beta 2}$ (Médio)	q_s SPT (kPa)	q_s Projeto SPT (kPa)	Tipo de Solo
AR00	38,5	210	144	22	9	228	160	Solo Residual
AR01	34,5	166	85	13	8	228	160	Maduro - Argila Arenosa
AR02	27,5	227	174	13	8	286	190	Solo Residual
AR03	21,5	274	199	12	7	316	220	Jovem - Areia
AR04	17,5	260	159	13	8	316	220	Argilosa

A Figura 116 compara graficamente os diversos valores de q_s apresentados na Tabela 26.

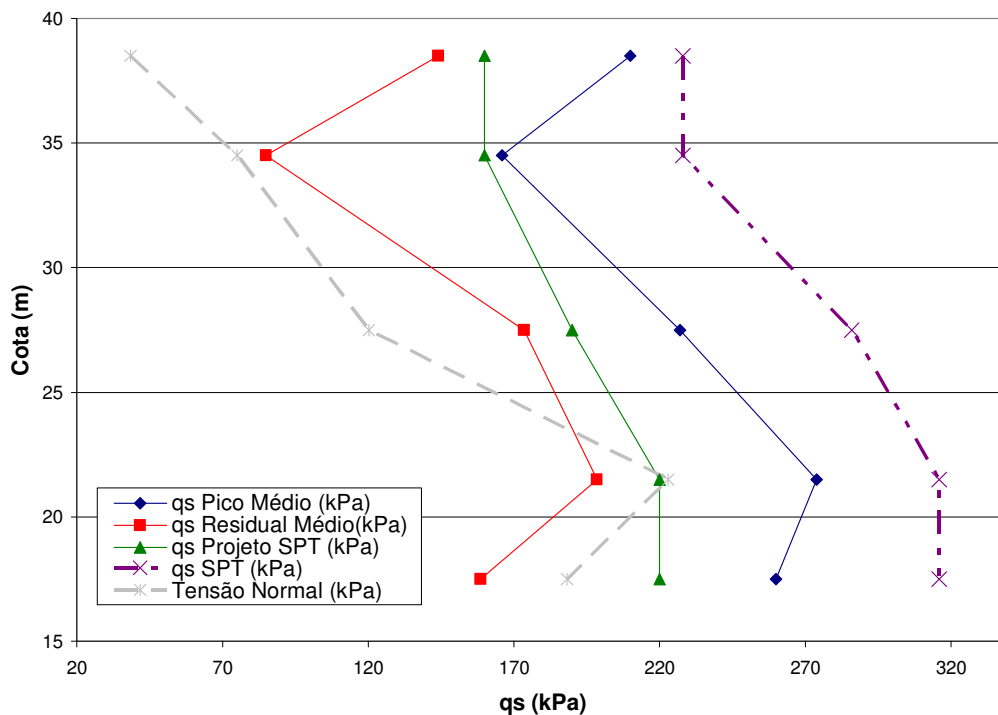


Figura 116 - Variação de q_s em função da cota de elevação para diferentes métodos de obtenção.

É possível observar que a curva relativa ao q_s de Projeto para o ensaio SPT situa-se entre as curvas de q_s (pico e residual) para os ensaios de arrancamento.

Os valores de q_s obtidos simplesmente pela correlação com o SPT (q_s SPT) mostraram-se superiores aos valores de pico obtidos para o ensaio de arrancamento. Executar um projeto apenas com o uso da correlação proposta seria contra a segurança.

Os valores de q_s parecem depender do aumento da tensão normal sobre os grampos. Vale também destacar que a encosta apresenta um perfil de intemperismo evidente, dessa forma deve-se esperar que os esforços para o arrancamento dos grampos sejam maiores devido à natureza menos intemperizada dos materiais localizados em cotas inferiores.

A Figura 117 mostra a variação de k_β com a profundidade. Os valores de $k_{\beta 1}$ e $k_{\beta 2}$ foram determinados através das curvas Carga x Deslocamento e referem-se a dois estágios diferentes de rigidez antes da ruptura para o ensaio de arrancamento. O parâmetro não apresenta variação significativa com a profundidade. O primeiro valor para $k_{\beta 1}$ muito superior aos outros valores, pode ser atribuído à diferença de rigidez devido à injeção de nata de cimento na região do cupinzeiro. Os dados obtidos estão dentro da ordem de grandeza proposta por Clouterre (2001).

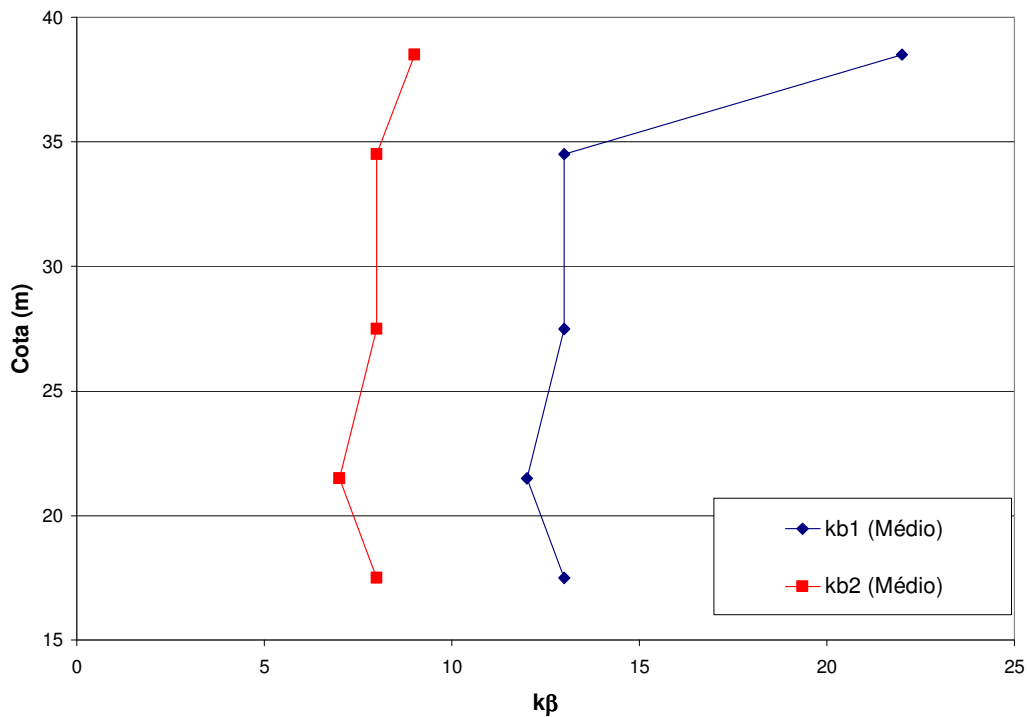


Figura 117 - Evolução de k_β com a profundidade.