

5 Programa experimental

A técnica de grampeamento de solos carece de estudos mais detalhados sobre a influência, na determinação da resistência ao arrancamento [q_s], de parâmetros tais como o intervalo de tempo de cura da calda de cimento, o número de injeções, a lavagem do furo e o tipo de solo.

Definiu-se um programa experimental de 25 ensaios de arrancamento. Os grampos foram executados, em solo residual de gnaise, com ângulo de inclinação de 10 graus, diâmetro variando entre 75 e 100mm (3 e 4 polegadas) e comprimento total de 4 metros (3m injetados e 1m livre).

O programa experimental teve por objetivo permitir o estudo do comportamento tensão-deformação e a resistência ao arrancamento de grampos, em função do número de injeções de nata de cimento (1 ou 2 injeções), do método de perfuração (com ou sem lavagem do furo) e do tempo de cura da nata de cimento (3 ou 10 dias).

Este capítulo apresenta a geologia das áreas de estudo, o programa de ensaios de laboratório e de campo e a metodologia de instrumentação dos grampos da presente pesquisa.

5.1. Geologia das áreas de estudo

A geologia desempenha um papel muito importante em taludes rochosos ou que misturam solos e rochas (Kanji, 2004).

Os ensaios de arrancamento foram executados em três obras de escavação e grampeamento em solo residual, localizadas no município de Niterói, estado do Rio de Janeiro: Morro do Palácio e encosta da Rua Fagundes Varela (Figura 40).

O Morro do Palácio, área que compreende as obras denominadas Museu 1 e Museu 2, está localizado entre as Praias das Flechas e da Boa Viagem, próximo ao Museu de Arte Contemporânea (MAC) de Niterói (Figura 41). O estudo sobre os aspectos geológico, geotécnicos e geomorfológicos do local foi realizado por Gomes Silva (2006) e é resumido a seguir.



a) vista geral incluindo a Baía de Guanabara



b) vista da região de Icaraí, em Niterói

Figura 40 – Localização das obras Museu 1 e 2 (Morro do Palácio) e Fagundes Varela



a) vista geral do Morro do Palácio



b) detalhes das obras Museu 1 e 2

Figura 41 – Visão global das obras Museu 1 e 2

A área tem geologia marcada por grande diversidade de rochas, sistema de falhamentos de direção NE-SW e mergulho acentuado para SE. Intercalam-se quartzito, granada-biotita gnaisse, gnaisse calcissilicático, kinzigito, veios de pegmatito e diques de diabásio alterados, sobrepostas às rochas pré-cambrianas que formam o embasamento da Baía da Guanabara. As rochas, na área do estudo, encontram-se alteradas, formando um espesso pacote de solo residual. O talude da escavação grampeada apresentou uma inclinação de 86°, altura aproximada de 20 metros e cerca de 50 metros de extensão, em solo residual gnáissico silto-areno-argiloso (Gomes Silva, 2006).

Essas encostas apresentam espessa camada de solo residual areno-argiloso, sobrejacente a uma camada de saprolito (rocha alterada) extremamente friável, muito quartzosa e de granulometria grosseira, com fragmentos de feldspatos ainda preservados (Gomes Silva, 2006).

O sistema de descontinuidades na área é formado pelo bandamento 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 descontinuidades existentes no maciço (atitude, persistência, espaçamento, abertura, preenchimento, percolação, rugosidade) é apresentada na Tabela 27 (Gomes Silva, 2006).

Tabela 27 - Descontinuidades do maciço do Morro do Palácio (Gomes Silva, 2006)

Descontinuidade	Direção / Mergulho (graus)	Espaçamento (mm)	Persistência (m)	Abertura (mm)	Observações
Foliação F1	100/20	< 2	> 20	< 0,5	Descontinuidades sem solo e sem água
Fratura F2	70/90	30	7	0,3	
Fratura F3	150/90	50	8	0,5	
Fratura F4	80/30	150	5	0,1	
Fratura F5	120/08	85	8	0,2	

Para o talude superior da obra do Museu 1, o mapeamento geológico-geotécnico de Gomes Silva (2006) define 3 tipos de solos: (1) Silte areno-argiloso amarelo; (2) Argila-arenosa marrom avermelhada; e (3) Silto-argiloso branco. Neste mapeamento (Figura 42), foram marcadas as posições dos ensaios de arrancamento da presente pesquisa e dos grampos permanentes instrumentados para monitoramento dos esforços. Os grampos de monitoramento pertencem a uma outra tese de doutorado em desenvolvimento

(André Lima da PUC-Rio). Nota-se que o solo referente aos ensaios de arrancamento de M1-01 até M1-14 é classificado como Argila-arenosa marrom avermelhada, correspondendo a um solo maduro e homogêneo.

Para o talude inferior da obra do Museu 1, o mapeamento geológico-geotécnico de Gomes Silva (2006) apresentado na Figura 43, define 5 tipos de solos: (1) Silte areno-argiloso amarelo; (2) Argila-arenosa marrom avermelhada; (3) Silto-argiloso branco e (4) Silte argilo-arenoso laranja. Neste mapeamento foram marcadas as posições dos ensaios de arrancamento da presente pesquisa. Nota-se que o solo referente aos ensaios de arrancamento de M1-15 até M1-18 é classificado como silte areno-argiloso amarelo, correspondente a um solo residual jovem. O solo referente aos ensaios de arrancamento M1-19 e M1-20 é um argila-arenosa marrom avermelhada, caracterizado como rocha alterada.

O mapeamento de Gomes Silva (2006), para o primeiro talude de contenção da obra do Museu 2, define 2 tipos de solos: (1) Silte areno-argiloso amarelo; e (2) Argila-arenosa marrom avermelhada. Neste mapeamento (Figura 44) foram marcadas as posições dos ensaios de arrancamento da presente pesquisa. Nota-se que o solo referente aos ensaios M2-01 e M2-02 é classificado como silte areno-argiloso amarelo, solo residual jovem.

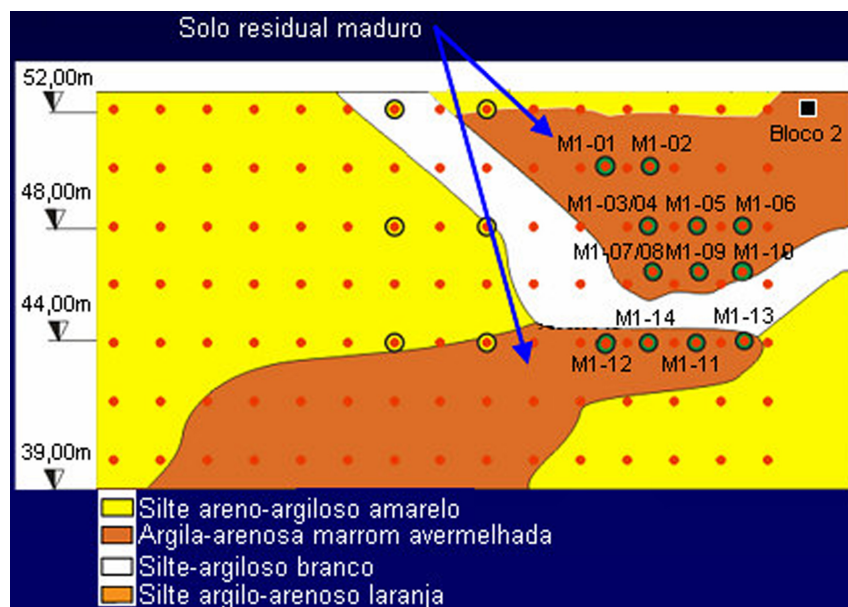


Figura 42 – Mapeamento geológico-geotécnico do Museu 1 – Talude superior (adaptado de Gomes Silva, 2006)

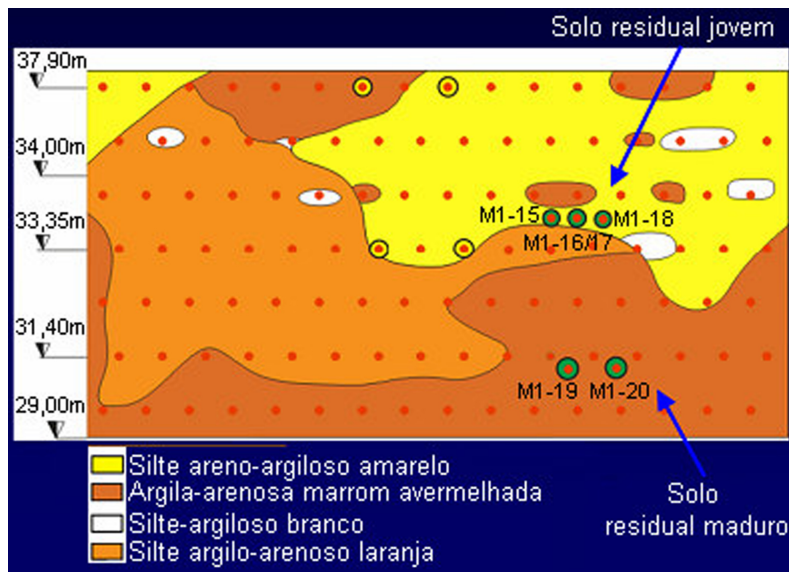


Figura 43 – Mapeamento geológico-geotécnico do Museu 1 – Talude inferior (adaptado de Gomes Silva, 2006)

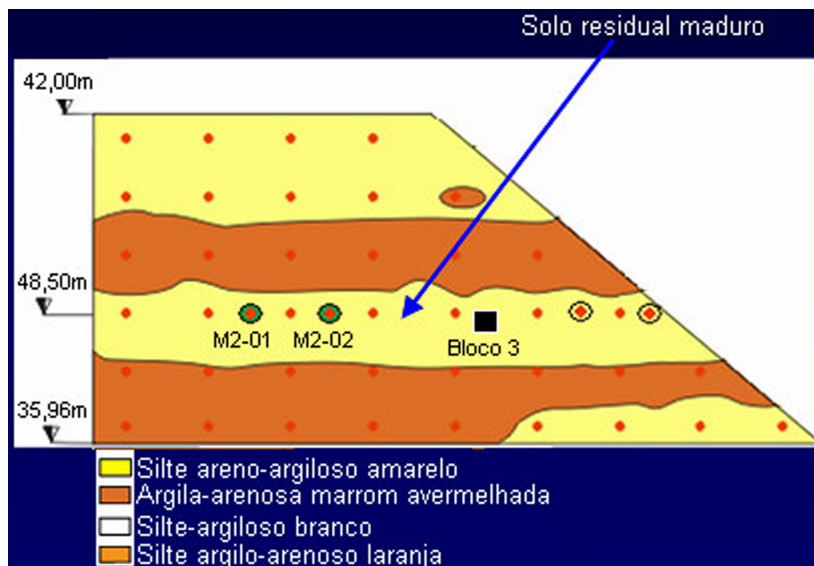


Figura 44– Mapeamento geológico-geotécnico do Museu 2 (adaptado de Gomes Silva, 2006)

5.2. Ensaios de laboratório

Nesta pesquisa, foram detectados 7 tipos de solos, localizados em três obras (Fagundes Varela, Museu 1 e Museu 2). A Tabela 28 apresenta uma síntese dos ensaios de arrancamento de grampos realizados e os respectivos solos adjacentes e ensaios de laboratórios realizados.

Tabela 28 – Ensaio de laboratório realizados em cada tipo de solo

Nomenclatura do tipo de solo	Ensaio de arrancamento realizados em um mesmo solo	Obra	Cota de ensaio [m]	Características do solo	Ensaio de laboratório realizados	
Solo 1	FV-01	Fagundes Varela	6,0	Solo residual maduro vermelho	-	
Solo 2	FV-02 FV-03		0,3	Solo residual jovem	Cisalhamento direto e Caracterização	
Solo 3	M1-01 M1-02	Museu 1	50,0	Solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada)	Cisalhamento direto e Caracterização	
	M1-03 M1-04 M1-05 M1-06		48,0			
	M1-07 M1-08 M1-09 M1-10		46,0			
Solo 4	M1-11 M1-12 M1-13 M1-14		44,0	Solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada e solo silto-argiloso branco)	-	
Solo 5	M1-15 M1-16 M1-17 M1-18		34,0	Solo residual jovem (silte areno-argiloso amarelo)	Ensaio de rampa (Gomes Silva, 2006)	
Solo 6	M1-19 M1-20		31,4	Rocha alterada (argila-arenosa marrom avermelhada)	Caracterização e Ensaio de rampa (Gomes Silva, 2006)	
Solo 7	M2-01 M2-02		Museu 2	38,5	Solo residual maduro (silte areno-argiloso amarelo)	Cisalhamento direto e Caracterização (Proto Silva, 2005)

Para o primeiro ensaio de arrancamento da pesquisa (ensaio FV-01), não foi possível obter amostras de solo para a realização de ensaios de laboratório. Por inspeção visual, pode-se classificar o solo como maduro, avermelhado e homogêneo (Solo 1).

Na Fagundes Varela, foi extraído um bloco localizado a 1,5m de distância do grampo FV-03 e na mesma cota. Os ensaios de laboratório realizados no material consistiram de caracterização e de cisalhamento direto. O solo foi definido como solo residual jovem, de coloração marrom-clara (Solo 2).

No Museu 1, na cota 52m, foi extraído um bloco de solo residual maduro que foi utilizado para ensaios de caracterização e de cisalhamento direto (Bloco 2, Figura 42). Pode-se afirmar que os ensaios de arrancamento de M1-01 a M1-10 foram realizados em solo com as mesmas características, correspondente ao solo 3, classificado como Argila-arenosa marrom avermelhada, solo maduro e homogêneo. O solo 3 é encontrado desde a cota 50 até a cota 46m (Figura 42).

Na cota 44m do Museu 1, esperava-se que, pela coloração do solo e por se tratar de um solo residual maduro (além da classificação geológico geotécnica, Figura 42), que as características fossem as mesmas que a do Solo 3. Porém, os resultados dos ensaios de arrancamento (deslocamentos de arrancamento excessivos, maiores que 135mm) não deixam dúvidas de que se trata de um solo diferente (Solo 4). É provável que, além do Argila-arenosa marrom avermelhada, também haja interseção de solo silto-argiloso branco ao longo do comprimento do grampo. Não foi possível extrair uma amostra de solo desta cota.

Na cota 34m do Museu 1, foi também impossível retirar um bloco por se tratar de um solo residual muito jovem e resistente (silte areno-argiloso amarelo). Neste Solo 6, há resultados de ensaios de cisalhamento em plano inclinado, realizados em laboratório (Gomes Silva, 2006).

Na cota 31,4m do Museu 1, encontrou-se rocha alterada (argila-arenosa marrom avermelhada) e foram realizados ensaios de caracterização do material e ensaio no equipamento de plano inclinado (Gomes Silva, 2006).

Na cota 38,5m do Museu 2, foi retirado um bloco (Bloco 3, Figura 44) e realizados ensaios de caracterização e de cisalhamento direto do Solo 7 (silte areno-argiloso amarelo), caracterizado como sendo um solo residual maduro (Proto Silva, 2005).

5.3. Ensaio de campo

Foram realizados 25 ensaios de arrancamento, objetivando-se estudar a influência de parâmetros importantes para o comportamento de solo grampeado, tais como o número de injeções, o tempo de cura e a execução ou não de pré-lavagem do furo.

A Figura 45 apresenta a localização em perfil dos ensaios de arrancamento, ressaltando-se os diferentes tipos de solos encontrados e as obras em que foram executados.

Proto Silva (2005) executou 8 ensaios de arrancamento na obra Museu 2. No esquema da Figura 45 está representado, em linha pontilhada, o seu primeiro ensaio.

As características principais de cada ensaio de arrancamento (solo, cota, lavagem do furo, número de injeções, tempo de cura da nata, tipo de aço, diâmetro da barra de aço, diâmetro do furo, inclinação do talude e inclinação do grampo) são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Características dos ensaios de arrancamento dos grampos

Ensaio	Nº	Inclinação do talude	Solo	Cota	Lavagem	Número de injeções	Tempo de cura (dias)	Aço	Diâmetro da barra de aço (mm)	Diâmetro do furo (cm)	Inclinação do grampo
FV-01	1	90°	1	-	Não	1	3	CA50	25,4	10,16	10°
FV-02	2	90°	2	-	Não	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
FV-03	3	90°	2	-	Não	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-01	4	60°	3	50,0	Não	1	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-02	5	60°	3	50,0	Não	1	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-03	6	60°	3	48,0	Não	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-04	7	60°	3	48,0	Não	2	10	CA50	25,4	10,16	10°
M1-05	8	60°	3	48,0	Não	2	10	CA50	25,4	10,16	10°
M1-06	9	60°	3	48,0	Sim	2	10	CA50	25,4	10,16	10°
M1-07	10	60°	3	46,0	Sim	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-08	11	60°	3	46,0	Sim	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-09	12	60°	3	46,0	Sim	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-10	13	60°	3	46,0	Não	2	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-11	14	60°	4	44,0	Não	1	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-12	15	60°	4	44,0	Sim	1	3	CA50	25,4	10,16	10°
M1-13	16	60°	4	44,0	Não	1	10	CA50	25,4	10,16	10°
M1-14	17	60°	4	44,0	Sim	1	10	CA50	25,4	10,16	10°
M1-15	18	85°	5	34,0	Não	2	3	CA75	22,0	8,89	10°
M1-16	19	85°	5	34,0	Não	2	3	CA75	22,0	8,89	10°
M1-17	20	85°	5	34,0	Não	2	3	CA75	22,0	8,89	10°
M1-18	21	85°	5	34,0	Não	1	3	CA75	22,0	8,89	10°
M1-19	22	90°	6	31,4	Não	2	3	CA75	22,0	8,89	10°
M1-20	23	90°	6	31,4	Não	2	3	CA75	22,0	8,89	10°
M2-01	24	80°	7	38,5	Não	1	3	CA75	22,0	7,62	11°
M2-02	25	80°	7	38,5	Não	2	3	CA75	22,0	7,62	18°

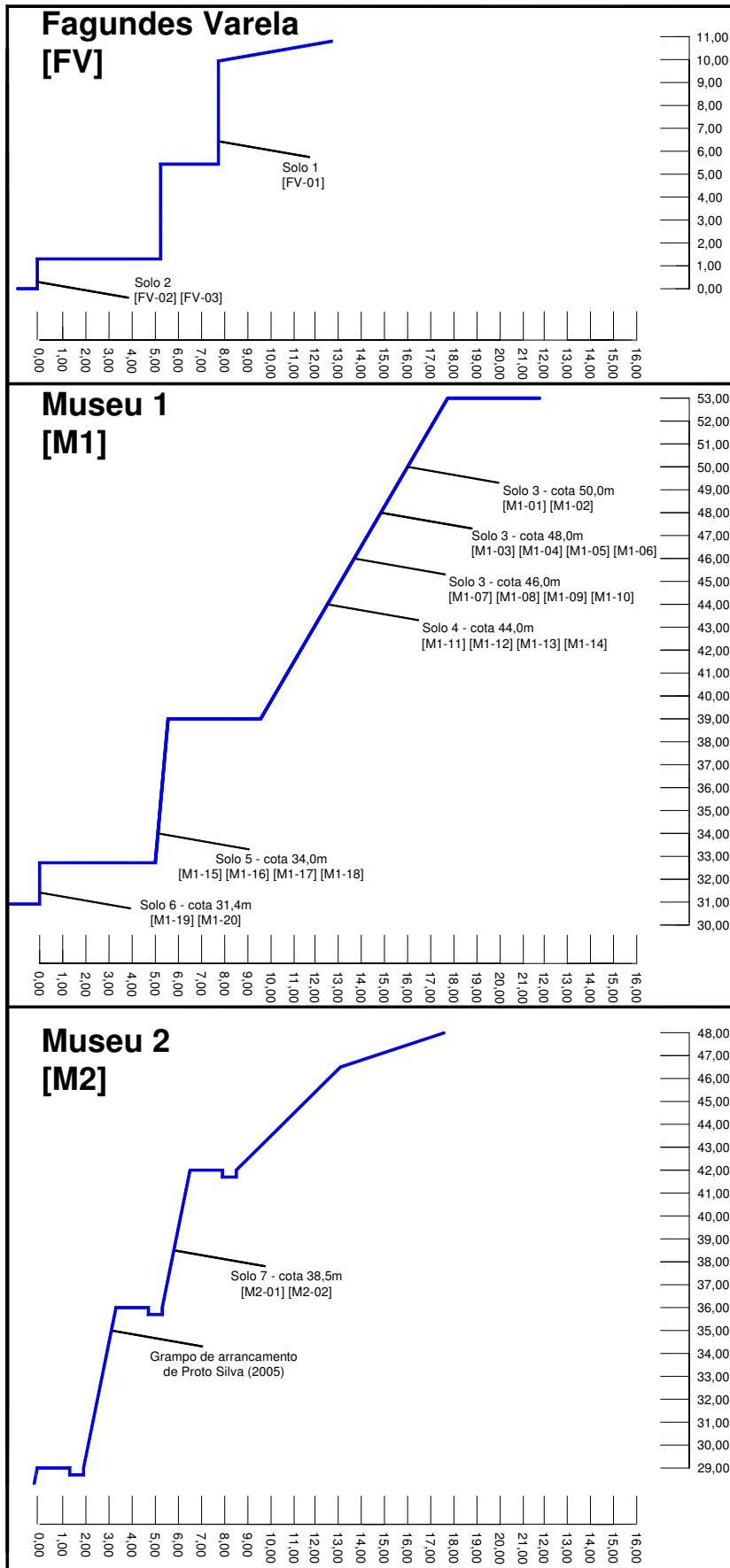


Figura 45 – Localização dos ensaios de arrancamento executados nas 3 obras

5.3.1. Influência do número de injeções

A partir da Tabela 29 pode-se verificar que sete pares de ensaios foram programados para se tentar quantificar o ganho de resistência ao arrancamento proporcionado pela execução de uma operação de re-injeção de calda de cimento no grampo. A Tabela 30 especifica estes ensaios.

Tabela 30 – Ensaios para estudo da influência do número de injeções

Parâmetros comuns		Ensaios	
Tempo de cura	Lavagem do furo	1 injeção (Bainha)	2 injeções (Bainha + 1 injeção)
3 dias	Não	M1-18	M1-15
3 dias	Não	M1-18	M1-17
3 dias	Não	M1-11	M1-10
3 dias	Não	M1-01	M1-10
3 dias	Não	M1-02	M1-10
3 dias	Não	M2-01	M2-02
3 dias	Sim	M1-12	M1-09

5.3.2. Influência do tipo de injeção

Nesta pesquisa, as re-injeções padrão foram executadas com uma mangueira de polietileno de 10mm de diâmetro e 1mm de espessura, dotada de válvulas de re-injeção a cada 50cm, no trecho injetado. Para se avaliar a eficiência deste tipo de re-injeção, foram realizados estudos comparativos por meio de ensaios de arrancamento em grampos re-injetados pela boca do furo (pela simples re-introdução do tubo de injeção ou utilizando-se a mangueira de “retorno” da nata). A Tabela 31 apresenta estes ensaios.

Tabela 31 – Tipos de re-injeção

Parâmetros comuns		Parâmetros de estudo	
Tempo de cura	Lavagem do furo	Re-injeção no início do grampo com mangueira acessória	Re-injeção ao longo do comprimento (mangueira com válvulas a cada 0,5m)
3 dias	Não	FV-03	FV-02
3 dias	Sim	M1-08	M1-09
3 dias	Não	M1-19	M1-20

5.3.3. Influência do tempo de cura

Na Tabela 32 verifica-se que quatro pares de ensaios foram especificados para se verificar a influência do tempo de cura da nata de cimento injetada no grampo.

Tabela 32 – Ensaio para estudo da influência do tempo de cura da injeção

Parâmetros comuns		Ensaio	
Lavagem do furo	Número de injeções	Cura de 3 dias	Cura de 10 dias
Não	1	M1-11	M1-13
Sim	1	M1-12	M1-14
Não	2	M1-10	M1-05
Sim	2	M1-09	M1-06

5.3.4. Influência do efeito da pré-lavagem

O programa experimental apresentado na Tabela 29 mostra que três pares de ensaios foram executados para se constatar a eventual influência de se proceder uma operação de pré-lavagem do furo, antes da injeção. A Tabela 33 apresenta estes ensaios.

Tabela 33 – Ensaio para estudo da influência da lavagem do furo

Parâmetros comuns		Ensaio	
Tempo de cura	Número de injeções	Furo Não Lavado	Furo Lavado
3 dias	1	M1-11	M1-12
3 dias	2	M1-10	M1-09
10 dias	2	M1-13	M1-14

5.4. Metodologia de execução dos ensaios

A Figura 46 apresenta o esquema de montagem do ensaio de arrancamento utilizado nesta pesquisa. Observa-se, na ordem da seqüência, os seguintes principais componentes:

- (1) Placa de aço de reação;
- (2) Grade de reação;
- (3) Macaco hidráulico;
- (4) Célula de carga;
- (5) Placa de referência;
- (6) Porca;

(7) Extensômetro analógico.

O eixo do macaco e o eixo do grampo devem estar alinhados. É também importante manter o extensômetro alinhado ao eixo do grampo.

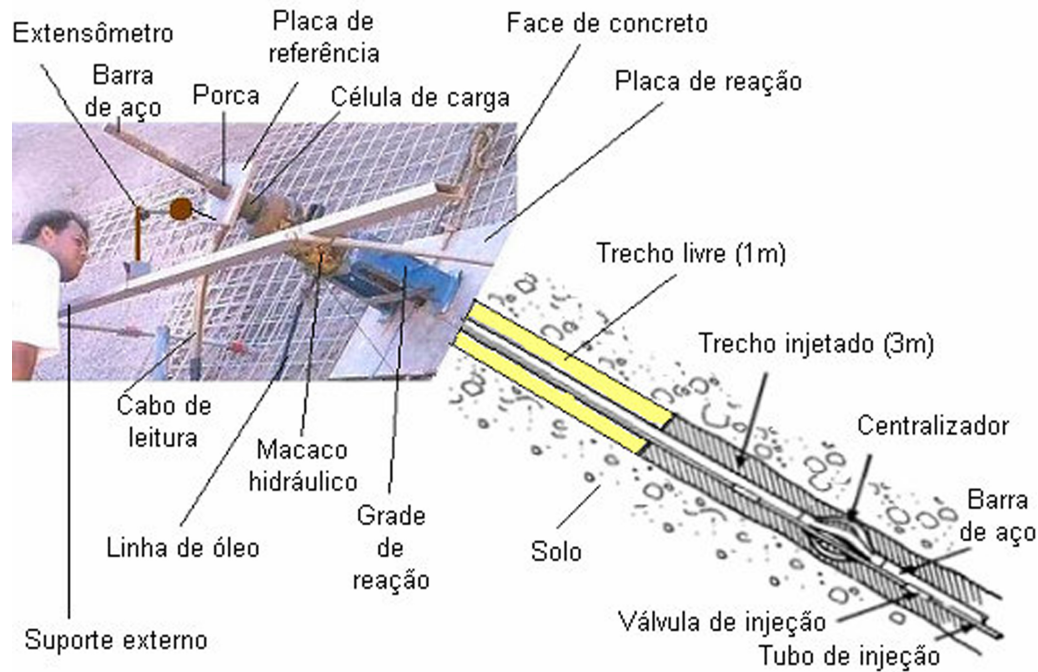


Figura 46 – Montagem do sistema de ensaio de arrancamento de grampo

A instalação típica dos grampos no talude foi executada por meio de furo com 4m de comprimento, inclinação de 10° e diâmetro de 10,16cm. Entretanto, a Tabela 29 mostra que, em alguns casos, o furo foi executado com diâmetro de 8,89 ou 7,62cm e inclinação de 11° ou 18° . O comprimento total das barras era de 4,25m, possuindo um trecho externo de 25cm com rosca. O trecho rosqueado permitia a instalação de uma luva e uma barra de extensão para montagem do sistema de arrancamento.

Os ensaios de arrancamento foram realizados em grampos com um trecho livre de 1m de comprimento, seguido de um trecho injetado com calda de cimento e com comprimento de 3m. Para garantir o controle dos comprimentos injetados, os grampos de arrancamento foram instalados com um obturador que consistia de uma espuma molhada, enrolada na barra e amarrada com arame (Figura 46 e Figura 47).

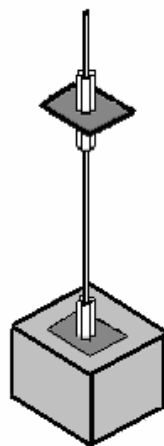
O cimento utilizado na mistura para preenchimento dos furos dos grampos foi o cimento Portland do tipo CP-II-E-32RS (cimento composto com escória e resistente aos sulfatos) da marca NASSAU.



Figura 47 - Colocação de espuma na barra de aço para garantia do trecho livre

O fator água/cimento utilizado foi de 0,6, ou seja, 1 saco de cimento de 50kg para cada 30 litros de água, esta obtida no próprio canteiro da obra. A bomba de injeção utilizada, da marca SONDEC, era acionada por pistões hidráulicos, com retorno e pressão máxima da ordem de 10MPa.

Nesta pesquisa, foi utilizado um suporte externo e independente do movimento do macaco e da parede para a fixação do extensômetro, formado por uma haste vertical de aço, engastada em um bloco de concreto. A haste era munida de duas luvas, para a fixação de uma placa metálica que servia de apoio ao extensômetro (Figura 48).



A) Suporte do extensômetro



B) Detalhe

Figura 48 - Suporte externo para apoio do extensômetro

As luvas se posicionavam abaixo e acima da placa, possibilitando o ajuste da placa e do extensômetro para as medidas de deslocamento da cabeça do

grampo. O extensômetro utilizado possuía um curso de 50mm e resolução de 0,01 mm.

Para garantir o cobrimento da barra de aço do grampo ao longo de seu comprimento, evitando o contato com a parede do furo, foram colocados dois centralizadores, fixados à barra por meio de arame (Figura 49a).

Uma tubulação para preenchimento do furo com nata de cimento (Figura 49a e b) era introduzida até o final do furo para que fosse feita a primeira injeção (bainha). Os furos foram preenchidos de forma ascendente (do fundo para o exterior) e, uma vez observada a drenagem da calda de cimento pelo tubo de retorno, o bombeamento era interrompido.



Figura 49 - Inserção dos componentes de um grampo tipo re-injetado no furo

No caso de re-injeção (Bainha + 1 injeção), a barra de aço era preparada com uma mangueira de polietileno com 9,5mm de diâmetro e 1mm de espessura. Esta mangueira era dotada de válvulas de re-injeção, a cada 50cm, no trecho injetado. A segunda injeção era executada três horas após o preenchimento da bainha com nata de cimento. A pressão de re-injeção era registrada no manômetro da bomba de injeção. Os ensaios de arrancamento foram executados em 3 ou 10 dias após a injeção da nata de cimento da bainha do grampo.

O objetivo desta re-injeção foi garantir o preenchimento do furo com nata, evitando os vazios eventuais após o preenchimento da bainha e por exsudação da calda. A segunda injeção melhora o contato da nata de cimento com o solo, aumentando, conseqüentemente, a resistência ao arrancamento do grampo.

As válvulas de re-injeção eram feitas por meio de um pequeno corte, com alicate, na mangueira, e vedação com fita crepe, dando-se apenas uma volta no diâmetro. Com a pressão da re-injeção estas fitas eram rompidas.

O conjunto bomba-macaco para aplicação de carga no grampo era da marca Enerpac, com capacidade de 600kN. A célula de carga usada nos ensaios tinha capacidade de 200kN.

Os furos dos grampos foram realizados com perfuratriz rotativa hidráulica por via seca e a limpeza do furo feita com ar comprimido (grampo não lavado) e com ar comprimido e água (grampo lavado). Este tipo de equipamento é recomendado para solos com baixo teor de umidade. Em terrenos úmidos, a própria perfuratriz deve utilizar água para perfuração e limpeza do furo.

Todos os grampos foram ensaiados de maneira similar. A primeira parte dos ensaios consistiu na aplicação de uma pequena carga (por meio do aperto da porca com chave) para garantir um melhor ajuste do conjunto de placas, macaco-bomba, célula de carga e extensômetro. Após a estabilização do sistema de aquisição de dados, o valor da leitura inicial da célula de carga era anotado e começava-se então o ensaio. Aplicava-se a carga ao grampo por meio do macaco hidráulico em estágios de 1MPa (10kgf/cm²), correspondente a 8,2kN (840kgf) de força de tração. As medições de carga e deslocamento eram registradas pela célula de carga e extensômetro, respectivamente. Entre cada estágio de carga, aguardava-se o período de tempo necessário para a estabilização das deformações medidas pelos *strain gages* ao longo da barra. Prosseguia-se o ensaio até a ruptura ou até se atingir a carga de 200kN (limite da célula de carga). O ensaio também era finalizado no caso de deslocamentos crescentes do grampo sem incremento de carga.

5.5. Instrumentação dos grampos

Nesta pesquisa são analisados o comportamento tensão-deformação e a resistência ao arrancamento [q_s] dos grampos em função do método de execução, considerando fatores como lavagem do furo, número de re-injeções e tempo de cura, além do tipo de solo (variando de solo residual maduro a rocha alterada de gnaiss da cidade de Niterói, RJ). 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.

O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que relaciona pequenas variações de dimensão com variações equivalentes em sua resistência elétrica. Como componente de instrumentos especiais (transdutores), possibilita a medida de pressão, tensão, força e aceleração. O princípio de funcionamento baseia-se no aumento ou redução da resistência de um condutor quando submetido a forças de tração ou de compressão.

Para as medidas de deslocamento na cabeça do grampo, poderiam ter sido usados medidores elétricos de deslocamento (LVDT's) ou extensômetros analógicos. A segunda opção foi escolhida por ser a mais acessível, com menor custo e simplicidade de instalação e leitura.

5.5.1. Materiais adotados

Para a realização desta pesquisa foram instrumentadas 14 barras de aço. Foram utilizadas 8 barras de aço GG50 da Gerdau, com 25,4mm de diâmetro e tensão de escoamento de 500MPa (aço CA50), e 6 barras INCO-13-D, com diâmetro nominal de 22mm e tensão de escoamento de 750MPa (aço CA75). O comprimento total das barras CA50 era de 4,25m, possuindo um trecho de 25cm de rosca para a montagem do sistema de arrancamento (Figura 50). As barras CA75 possuíam rosca ao longo de todo o seu comprimento.

Cada barra de aço foi instrumentada com 5 extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) dispostos ao longo dos 3m de comprimento do trecho injetado, a intervalos de 50cm (Figura 50).

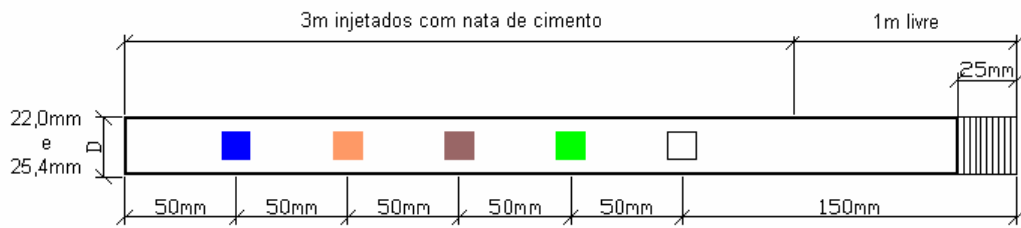


Figura 50 - Esquema da instrumentação da barra de aço e do grampo

Os extensômetros elétricos adotados para a instrumentação das barras de aço foram do tipo **PA – 06 – 125AA – 120 – LEN**, correspondendo à base de poliamida com filme metálico com auto-compensação de temperatura para aço, comprimento de elemento resistivo de 3,18mm ou 0,125”, resistência elétrica de 120 Ohms, encapsulados com fios de cobre, fabricado pela Excel Sensores Ltda.

Os extensômetros escolhidos para a pesquisa pertencem à família dos extensômetros coláveis de resistência elétrica, modelos unidirecionais simples de formas tradicionais (Figura 51).

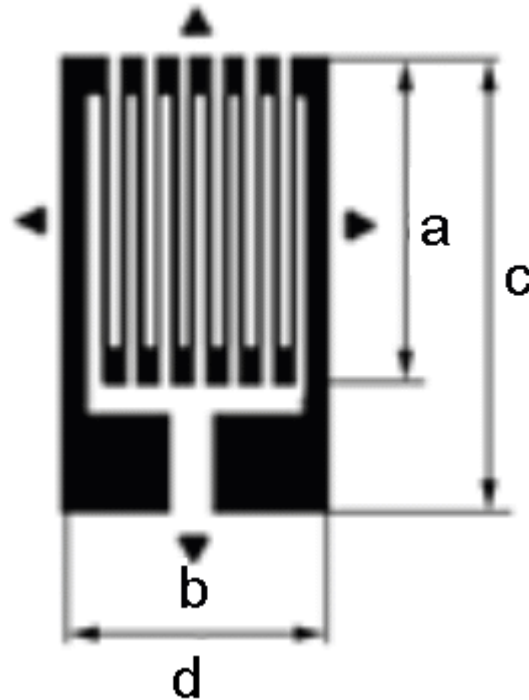


Figura 51 – *Strain gage* colável, modelo unidirecional simples de forma tradicional

A Tabela 34 apresenta um quadro resumo das características do extensômetro elétrico utilizado [PA – 06 – 125AA – 120 – LEN].

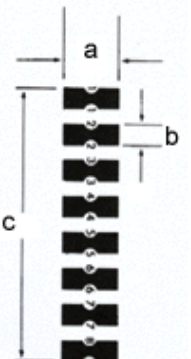
Tabela 34 – Características do extensômetro elétrico

Dimensões			
Grelha		Total	
A (Comprimento)	B (Largura)	C (Comprimento)	D (Largura)
3,18mm 0,125"	3,18mm 0,125"	6,35mm 0,250"	3,18mm 0,125"
Modelos			
Material da base e do filme metálico	Compensação de temperatura	Tamanho e forma da grelha	Resistência
	[ppm/°F]		[Ohms]
PA Base de poliamida com filme metálico de constantan	06 Para aço	125 número expresso em 1/1000 de polegada e forma AA	120
Opções de escolha: LEN – Extensômetros encapsulados com fios de cobre			

O valor teórico do Fator de Sensibilidade do extensômetro elétrico é $K = 2,1$. O valor real pode apresentar pequenas variações em torno do valor teórico, o qual deve ser informado em cada fornecimento, junto com a identificação do lote. O Fator de sensibilidade do lote utilizado nesta pesquisa foi igual a 2,00.

Foram também utilizados terminais coláveis de ligação para completar o sistema de instrumentação da barra de aço. A Tabela 35 apresenta as características dos terminais usados na pesquisa

Tabela 35 – Características dos terminais coláveis de ligação

Modelo	Código	Dimensões		
		a	b	C
	T – 100	4,75mm 0,187"	1,90mm 0,075"	22,86mm 0,900"

5.5.2. Instalação dos *strain gages*

A instalação dos *strain gages* nas barras de aço dos 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.

A Figura 52 apresenta as ferramentas e insumos empregados na instrumentação.



a) colagem dos *strain gages*



b) cabeamento dos *strain gages*



c) soldagem dos *strain gages*



d) proteção da instrumentação

Figura 52 – Insumos e ferramentas da instrumentação

A marcação dos pontos de fixação dos *strain gages* ao longo do comprimento da barra é o primeiro procedimento de instrumentação. As barras desta pesquisa foram marcadas a cada 50cm com 2 fitas crepes, deixando-se um pequeno vão de cerca de 3cm para colagem do *strain gage* e terminal após a usinagem da área (Figura 53).



Figura 53 – Marcação da distribuição dos *strain gages* ao longo da barra

O eixo de alinhamento dos *strain gages* é marcado preferencialmente antes da usinagem, para que a superfície a ser polida seja a menor possível. O eixo de alinhamento facilita o futuro cabeamento e a colagem dos *strain gages* e terminais. O alinhamento das barras CA50 é simples, uma vez que estas barras possuem duas linhas laterais em relevo ao longo de todo o comprimento, as quais dividem a barra ao meio. Desta forma, basta apoiar um gabarito nas linhas e marcar o eixo (Figura 54).



Figura 54 – Marcação do alinhamento das Barras CA50

Para se fazer o alinhamento nas barras INCO-13-D, rosqueadas ao longo de todo o comprimento, foi criado um dispositivo composto de um paquímetro preso a um esquadro e a um nível. Marcava-se o comprimento nivelado no

paquímetro com o esquadro apoiado à barra e se repetia o procedimento para se marcar todo o comprimento (Figura 55).



a) marcação dos pontos de alinhamento nivelados



b) traçado do eixo

Figura 55 – Marcação do alinhamento nas barras INCO-13-D rosqueadas

A marcação do eixo guia foi feita sobre fita crepe para não riscar a superfície de colagem do *strain gage*.

A superfície da barra de aço era preparada para receber a colagem do *strain gage*. Desta forma, fazia-se limpeza dos óxidos e a retirada de saliências, de maneira a deixar a superfície em condições adequadas de ausência de matéria estranha. Esta operação pode ser feita com o auxílio de ferramentas e materiais tais como: limas finas, esmeril, pó de carborundum, lixas (Barreto Jr, 2005).

As barras de aço utilizadas na instrumentação desta pesquisa foram usinadas com um equipamento do tipo policorte em que a lâmina foi substituída por um disco de lixa de grão 60 (Figura 56a e b) e posteriormente lixadas com politriz manual (Figura 56c).

O preparo final da superfície foi feito com lixas para metais números 240 e 120 (Figura 56d), de forma a produzir uma superfície plana, praticamente livre de rugosidade, garantindo o bom desempenho do *strain gage*. O lixamento foi executado com movimentos erráticos, evitando-se uma direção preferencial de polimento e garantindo uma melhor aderência do *strain gage*.

A limpeza da superfície com pincel ou trincha é recomendada para a retirada dos resíduos de usinagem.



a) Barra de aço CA50



b) Barra INCO-13-D



c) Politriz manual



d) Lixas números 120 e 240

Figura 56 – Preparação da superfície por meio de usinagem das barras

Em seguida, utilizou-se um solvente para eliminar todo o resíduo oleoso da superfície de colagem do extensômetro. Qualquer solvente, como tricloretileno, tolueno, acetona e benzina, pode ser utilizado, desde que não reaja com o material.

O solvente utilizado nesta pesquisa para limpeza foi álcool isopropílico (99,5°). O procedimento de limpeza da superfície também foi repetido imediatamente antes da colagem do *strain gage* (Figura 57).

O manuseio dos *strain gages* era feito com auxílio de pinças e de uma placa de vidro, previamente limpa com álcool isopropílico e gaze. A Figura 52 ilustra as principais ferramentas e insumos exigidos para a colagem do *strain gage*. O contato das mãos com o vidro deve ser evitado.

Uma vez apoiado na placa de vidro, o *strain gage* recebe uma fita adesiva especial, alinhada com o seu eixo (Figura 58). Esta fita auxilia na colagem do *strain gage* à superfície da barra de aço.



Figura 57 – Limpeza da superfície polida para recebimento do *strain gage*

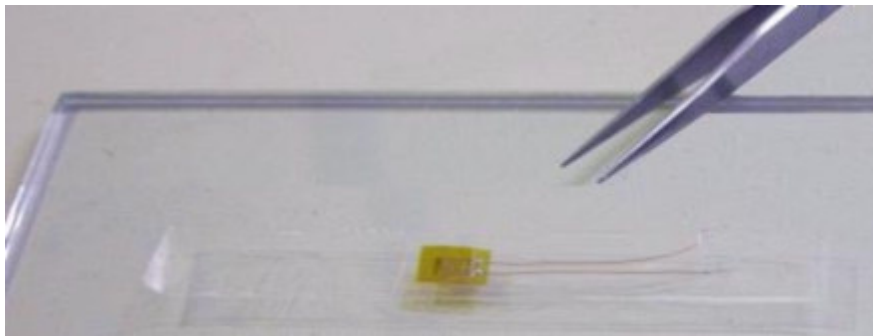


Figura 58 – Colagem da fita adesiva FK-1 alinhada ao eixo do *strain gage*

Uma vez alinhado o eixo do *strain gage* ao eixo da barra, colava-se a fita à barra de aço (Figura 59).

A escolha do adesivo é importante e deve ser feita em função do tipo de medição que se pretende efetuar. Os tipos de adesivos existentes no mercado são: adesivo de cianoacrilato, nitrocelulose, poliéster, acrílico, epóxi, poliamida, fenólico, cerâmico. Nesta pesquisa utilizou-se o adesivo de cianoacrilato de nome comercial Super Bonder® da Loctite, com tempo de cura de 2 minutos a 25°C, e é compatível com todos os tipos de extensômetros de resistência elétrica.



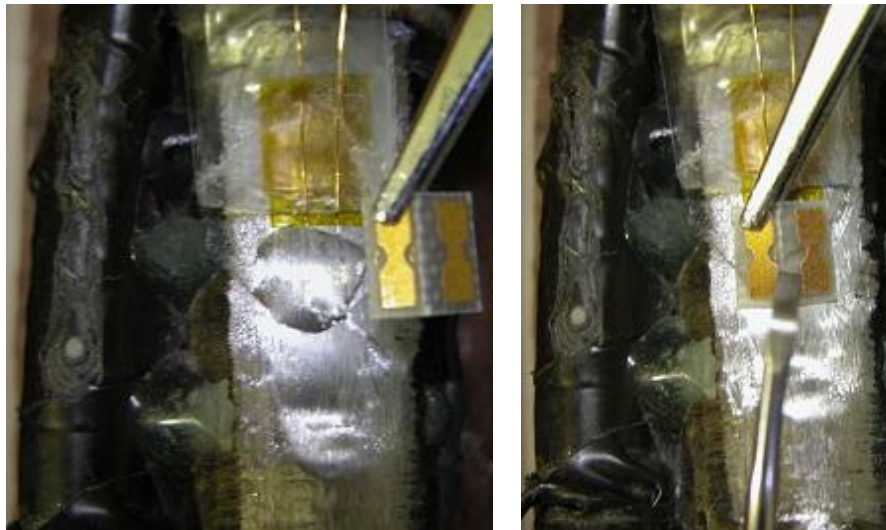
Figura 59 – Colagem da fita adesiva à barra de aço

Após a colagem do *strain gage*, removia-se a fita adesiva (Figura 60) e verificava-se a condição de funcionamento do extensômetro com ohmímetro de escala até 500M Ω . A resistência nominal informada pelo fabricante, de aproximadamente 120 ohms, era então verificada.



Figura 60 – Retirada da fita adesiva FK-1

Verificava-se também o isolamento entre o extensômetro e a superfície de colagem, prosseguindo-se com a soldagem dos fios. Para isto, utilizava-se um terminal de ligação (ponte de ligação), colado próximo à extremidade com fios do *strain gage* (Figura 61).



a) gota de cola aplicada à barra

b) colagem do terminal

Figura 61 – Colagem do terminal à barra de aço

O processo de ligação dos *strain gages* era feito por cabos de rede com 4 pares de fios, mais um cabo de telefonia com 1 par de fios para as barras de aço CA50 ou com 6 pares de fios de telefonia para as barras CA75. Além do

comprimento correspondente à barra de aço, previa-se um comprimento extra de aproximadamente 5m para que o cabo pudesse ser ligado ao sistema de aquisição de dados no campo sem a necessidade de emendas.

Os insumos e ferramentas utilizados na etapa de cabeamento foram: pinças, alicates de corte e de pressão, descascador de fio, fita isolante, estilete e abraçadeiras (Figura 52).

Após a fixação do cabo na barra, procedeu-se ao corte de aberturas vizinhas aos *strain gages*. A partir da abertura, pinçava-se o par de fios identificado para aquele *strain gage* (Figura 62). Cada *strain gage* possuía um par de fios de cores diferentes, reduzindo o risco de ligações inadequadas para a aquisição de dados.



a) seleção



b) corte

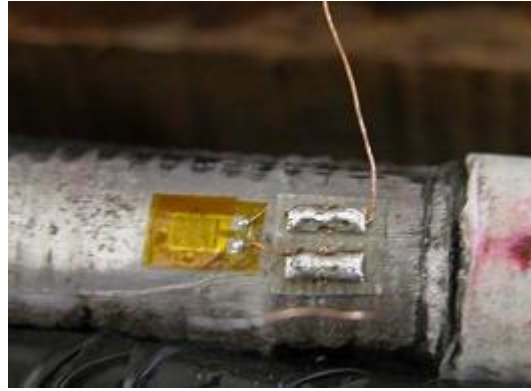
Figura 62 – Seleção e corte dos pares de fios de ligação dos *strain gages*

Os insumos e ferramentas da etapa de soldagem foram: ferro de solda, pasta de solda, aparelho de solda, pinças diversas e multímetro (Figura 52).

A soldagem dos fios no extensômetro era feita com solda de estanho com fluxo neutro, isto é, sem o uso de pastas comuns ou ácidos para facilitar a soldagem. Pode ser utilizado fio de solda de estanho para eletrônica com diâmetro de 0,7 ou 0,8 mm, que possua em sua composição maior quantidade de estanho do que de chumbo, no mínimo 60% por 40% (Barreto Jr, 2005).

A Figura 63 apresenta o resultado do cabeamento dos fios dos *strain gages* aos terminais e ao cabo de ligação, para o sistema de aquisição de dados e fonte de excitação.

Após a completa ligação dos fios, verificava-se novamente o funcionamento do *strain gage* e a qualidade da transmissão do sinal de resistência ao longo do cabo (Figura 64).



a) soldagem dos fios do strain gage ao terminal



b) soldagem dos fios do cabo ao terminal

Figura 63 – Soldagem dos fios dos *strain gages* aos terminais e ao caboFigura 64 – Verificação do cabeamento do *strain gage* e da transmissão de sinal

Os *strain gages* devem ser protegidos contra corrosão, choques mecânicos e curtos-circuitos. Esta operação garante a vida útil do medidor. As ligações devem ser isoladas de maneira a evitar um curto circuito entre os elementos. O mercado oferece uma ampla variedade de tipos de impermeabilizantes especiais, tais como: cera de abelha filtrada, borracha de

silicone, fita de autofusão, resina de poliéster, resina epóxi e massa asfáltica. A utilização destes materiais evita que a instalação sofra baixa de isolamento ou que seja afetada por contaminantes, tais como óleos ou gases corrosivos. A aplicação desses materiais é feita sobre o extensômetro e suas ligações, podendo ser fundidas ou catalisadas ou ainda na forma natural. É recomendado o uso da borracha de silicone não corrosiva 3145 RTV adesivo vedante, Silastic® 738 ou Silastic® 780, todos de fabricação da Dow Corning (Barreto Jr, 2005).

A Figura 52 apresenta os insumos e ferramentas utilizados nesta pesquisa para a proteção da instrumentação, tais como verniz, pincel, adesivo epóxi e selador adesivo de polímero MS.

Os *strain gages*, fios da instrumentação e superfície da barra foram envernizados com máscara protetora para placas de circuito impresso. Evitava-se o contato (curto circuito) dos fios com a barra de aço, com uma película de verniz entre os fios e a barra. O verniz protege *strain gage* da oxidação. Nesta pesquisa foram aplicadas, no mínimo, 4 camadas de verniz.

O adesivo epóxi utilizado foi do tipo Araldite de 10 minutos de cura. O procedimento era rápido, devido à perda de trabalhabilidade do adesivo, que era aplicado sobre o *strain gage*, sob e sobre os fios e na abertura do cabo (Figura 65). O araldite confere proteção contra água e corrosão, mas principalmente proteção mecânica contra choques e arrancamento da soldagem.

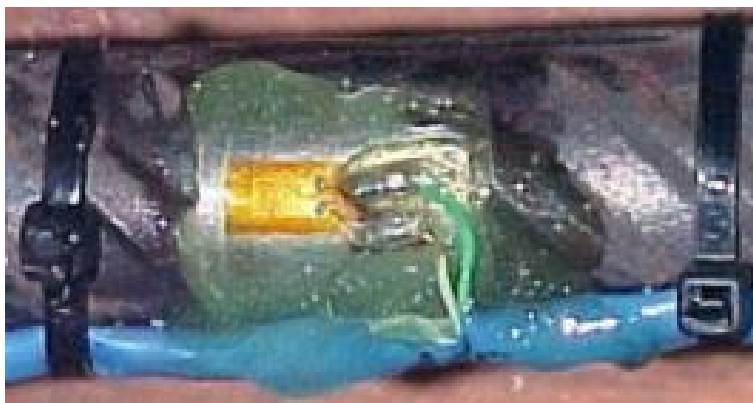


Figura 65 – Detalhe da araldite aplicada

O selador adesivo de polímero utilizado foi da marca Quilosa Sixtex (MS Industria), sendo aplicado sobre todo o conjunto *strain gage* – terminal – cabo (Figura 66).



a) aplicação



b) espalhamento



c) resultado final

Figura 66 – Aplicação de Quilosa Sintex para proteção do *strain gage* e conexões

5.5.3. 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 extensômetro elétrico é dada pela expressão (Daily e Riley, 1991):

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{R FS} = \frac{4 \Delta L_{\text{Ponte}}}{(V + 2 \Delta L) FS} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

ϵ : Deformação do extensômetro elétrico;

ΔR : Variação de resistência do extensômetro elétrico [ohms];

V: Voltagem de excitação da Ponte de Wheatstone;

R: Resistência nominal do extensômetro elétrico;

ΔL_{Ponte} : Variação de voltagem dos terminais 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 Equação 11 pode ser expressa por:

$$\epsilon = \frac{\Delta L_{\text{Ponte}}}{1500 + \Delta L_{\text{Ponte}}} \quad \text{Equação 11}$$

A deformação do *strain gage* pode ser interpretada em termos de força aplicada à barra de aço do grampo, por meio da teoria da Elasticidade, utilizando uma das seguintes expressões (Equação 12 ou Equação 13):

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{Equação 12}$$

ou

$$F = A E \epsilon = R \epsilon \quad \text{Equação 13}$$

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, a Equação 13 permite a conversão dos valores de deformação dos extensômetros elétricos em carga aplicada aos grampos.

A Tabela 36 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.

Tabela 36 - Deformação dos *strain gages* x carga nos grampos

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

5.5.4. Aquisição de dados

A Figura 67 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 por meio 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 (10kg/cm²) ou o correspondente a 8,2kN (840kgf) de força de tração no grampo. Além destes dados, monitorava-se também as leituras do extensômetro analógico e do manômetro do macaco adaptados ao sistema de arrancamento.

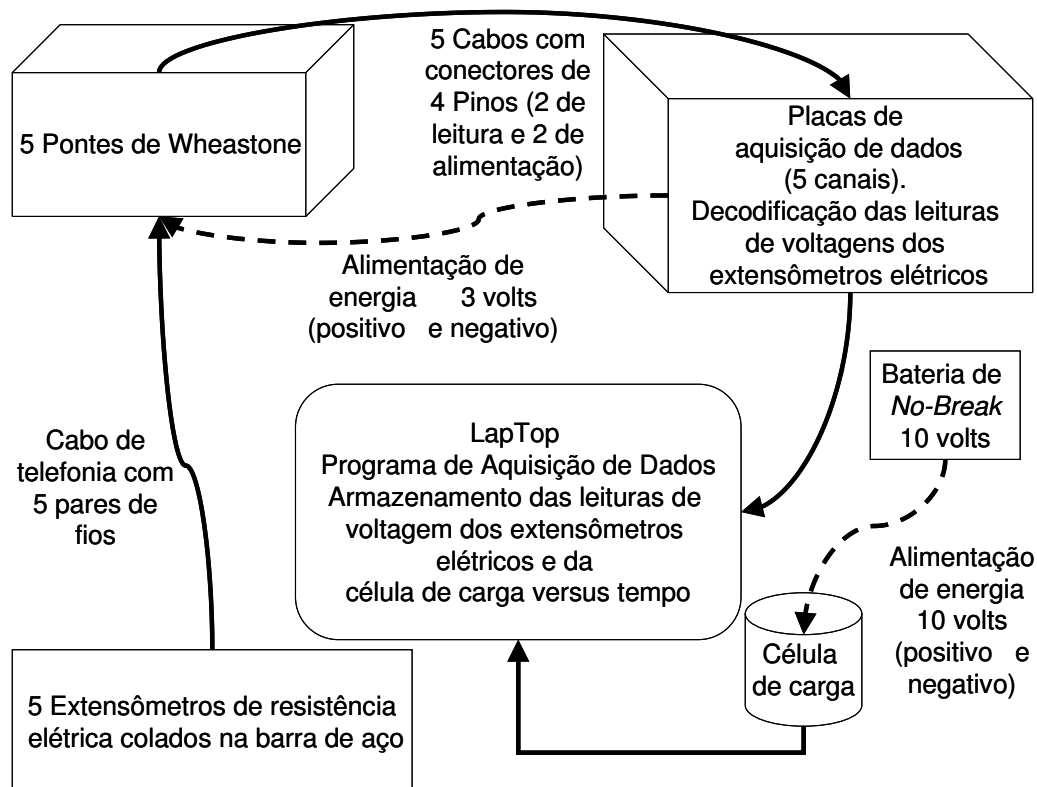


Figura 67 - Esquema de ligação dos equipamentos para aquisição de dados

A leitura de voltagem inicial da célula de carga descarregada era, na média, igual a 0,352V. Após finalizado o esquema de montagem do ensaio de arrancamento, o aperto das conexões conferia uma carga inicial (entre 0,6 e 1,8V nos 14 ensaios instrumentados), e implicando em uma pré-carga entre 4 e 24kN.

Para cada incremento de carga no macaco, registrava-se uma leitura de voltagem no sistema de aquisição. Esta leitura era subtraída da leitura da célula de carga descarregada (0,352V) e multiplicada pelo fator C para se obter a carga de tração aplicada no grampo em um determinado tempo, por meio da seguinte expressão:

$$F = [cc_{\text{Final}} - cc_{\text{inicial}}] \text{ volts} \times [1668,658] \text{ kgf / volts} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

F: Carga de tração aplicada ao grampo [kgf];

cc_{final}: Leitura final da célula de carga [V];

cc_{inicial}: Leitura inicial da célula de carga [V];

C: Fator de conversão da célula de carga [kgf/V] = 1668,658.