

7 Exumação de grampos

Foram realizadas quatro exumações de grampos: duas na Fagundes Varela em um solo residual jovem (FV-02 e FV-03) e duas no Museu 1 (M1-19 e M1-20), em uma rocha alterada.

O processo de exumação consiste numa atividade lenta e cuidadosa. Primeiro, utilizou-se uma retro-escavadeira com caçamba de 320 litros de capacidade, para a retirada do solo envolvendo os grampos, até uma distância segura, que não os danificassem. A seguir, utilizaram-se pás, cavadeiras e ponteiras, até que se conseguisse sacar os grampos inteiros e intactos.

Uma vez exumado, o grampo era cuidadosamente transportado, para evitar flexão e conseqüente fissuração, e posicionado em local seguro, para ser examinado e fotografado.

Deste exame, eram obtidos os diâmetros do grampo e o padrão de fissuração ao longo do comprimento.

Para ajudar nas análises, foram recolhidas amostras de solo adjacentes aos grampos durante o processo de exumação para posterior realização de ensaios de caracterização.

7.1. Obra Fagundes Varela [FV]

Dois grampos (FV-02 e FV-03) foram submetidos a ensaios de arrancamento e posteriormente exumados.

O grampo FV-02 foi preparado com mangueira de polietileno da Jetplast com 9,5mm de diâmetro e 1mm de espessura, com válvulas a cada 50cm para re-injeção. O tempo de cura da nata de cimento até a re-injeção foi de 3 horas.

O grampo FV-03, foi re-injetado pela boca da perfuração, por meio da inserção, no furo da mangueira de injeção de PVC (a mesma usada no preenchimento da bainha, ou primeira injeção), após 3h de cura da nata.

Após a exumação, foi constatado que este procedimento não deveria ter sido adotado, pois verificou-se a formação de um bulbo dilatado no início do grampo e um orifício com 2cm de diâmetro (diâmetro do PVC da mangueira de injeção) e com 60cm de extensão (Figura 115). Neste trecho, o bulbo chegou a ter o diâmetro aumentado de 100 para 200mm.



Figura 115 – Aspecto do grampo FV-03 após o ensaio e a exumação

A Tabela 37 apresenta as características dos grampos FV-02 e FV-03 e a Tabela 38 resume os resultados dos ensaios de arrancamento, por meio da Força máxima de arrancamento (F_{max}), resistência ao arrancamento (q_s) e deslocamento de arrancamento ($\Delta L_{arrancamento}$) e cisalhamento ($\Delta L_{cisalhamento}$). $\Delta L_{arrancamento}$ é o deslocamento correspondente à máxima força de ensaio; e $\Delta L_{cisalhamento}$, na hipótese de ocorrer fase de cisalhamento, corresponde ao maior deslocamento do ensaio.

Os resultados dos dois ensaios são muito parecidos. O grampo FV-03, re-injetado pela boca do furo, apresentou um valor de resistência ao arrancamento 6% maior que o grampo FV-02, re-injetado ao longo do comprimento do grampo. Com relação ao deslocamento no início do arrancamento, a diferença foi de apenas 2mm (Tabela 38).

A Figura 116 apresenta as curvas Carga x Deslocamento dos ensaios de arrancamento (FV-02 e FV-03). As curvas são praticamente coincidentes até a carga de 135kN, e as cargas de ruptura são muito próximas, respectivamente 159kN e 168kN para os grampos FV-02 e FV-03.

Tabela 37 – Características dos grampos FV-02 e FV-03

Grampo	Solo	Lavagem do furo	Número de injeções	Tempo de cura	Aço	Diâmetro da barra de aço	Diâmetro do furo	Inclinação do grampo
FV-02	2	Não	2	3 dias	CA50	1" ou 25,4mm	4" ou 10,16cm	10°
FV-03	2	Não	2	3 dias	CA50	1" ou 25,4mm	4" ou 10,16cm	10°

Tabela 38 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos FV-02 e FV-03

Grampo	F_{max} [kN]	$\Delta L_{arrancamento}$ [mm]	$\Delta L_{cisalhamento}$ [mm]	q_s [kPa]
FV-02	152	24	45	159
FV-03	161	22	50	168

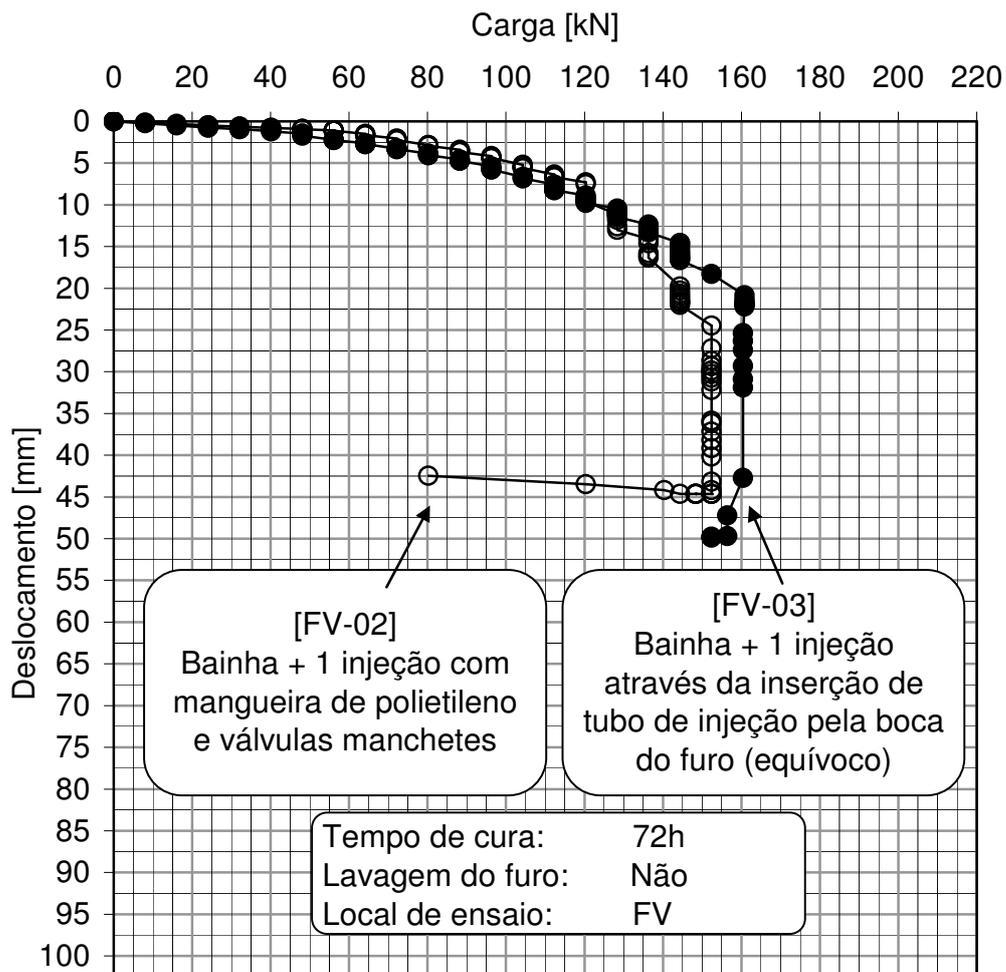


Figura 116 – Curvas Carga x Deslocamento dos grampos exumados FV-02 e FV-03

Durante a exumação foram recolhidas amostras deformadas de solos, adjacentes aos grampos, ao longo dos comprimentos injetados (de 1,0m até 4,0m). Estes materiais foram caracterizados no laboratório, obtendo-se os valores de densidade dos grãos (G_s), limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), conforme Tabela 39 e Tabela 40, e os histogramas de distribuição granulométrica ao longo do comprimento injetado do grampo (Figura 117 e Figura 118).

Tabela 39 – Resultados dos ensaios de laboratório dos solos do grampo FV-02

Posição ao longo do comprimento do grampo [m]	G_s Densidade real dos grãos	LL Limite de liquidez [%]	LP Limite de plasticidade [%]	IP Índice de plasticidade [%]
1,0	2,708	47,7	30,6	17,1
1,5	2,734	49,1	30,6	18,6
2,0	2,706	47,7	27,3	20,4
2,5	2,779	50,6	33,1	17,4
3,0	2,633	66,7	40,1	26,6
3,5	2,653	65,1	38,6	26,5
4,0	2,652	49,6	29,8	19,8

Tabela 40 – Resultados dos ensaios de laboratório dos solos do grampo FV-03

Posição ao longo do comprimento do grampo [m]	G_s Densidade real dos grãos	LL Limite de liquidez [%]	LP Limite de plasticidade [%]	IP Índice de plasticidade [%]
1,0	2,858	58,5	38,9	19,6
1,5	2,748	60,4	37,7	22,7
2,0	2,630	49,4	36,0	13,4
2,5	2,726	54,7	34,6	20,2
3,0	2,709	56,5	34,2	22,3
3,5	2,723	53,6	31,0	22,6
4,0	2,703	37,7	21,5	16,2

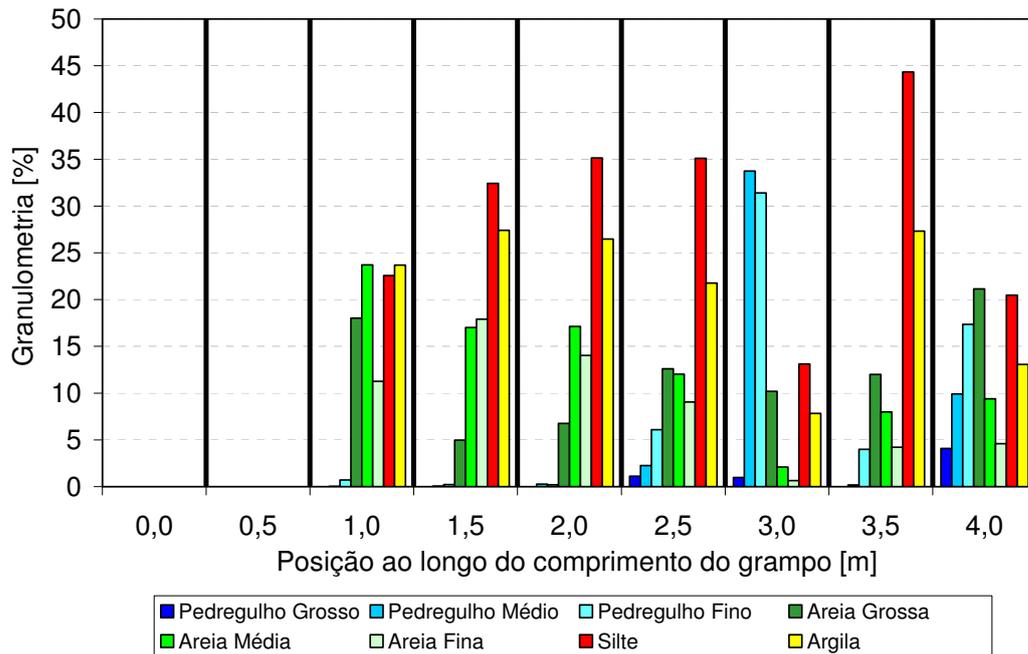


Figura 117 – Histogramas de distribuição granulométrica do solo do grampo FV-02

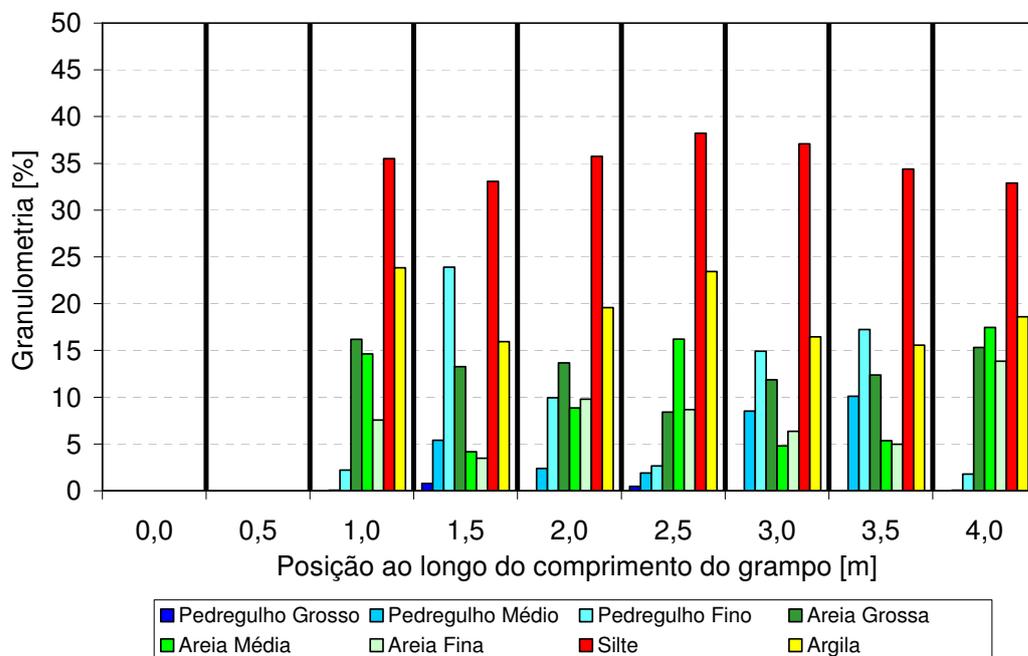


Figura 118 – Histograma de distribuição granulométrica do solo do grampo FV-03

Os histogramas de distribuição granulométrica de cada grampo demonstram a variabilidade de solos ao longo de cada grampo individualmente.

A Figura 119 destaca os diâmetros obtidos ao longo dos comprimentos dos grampos exumados e o aspecto do bulbo. Pode-se constatar a variabilidade de materiais ao longo de cada grampo e as diferenças entre os materiais colhidos nas mesmas distâncias nos dois grampos. No grampo FV-02, o material era mais homogêneo, predominando um solo residual jovem de cor vinho. No grampo FV-03, o solo apresentou predominância de quartzo.

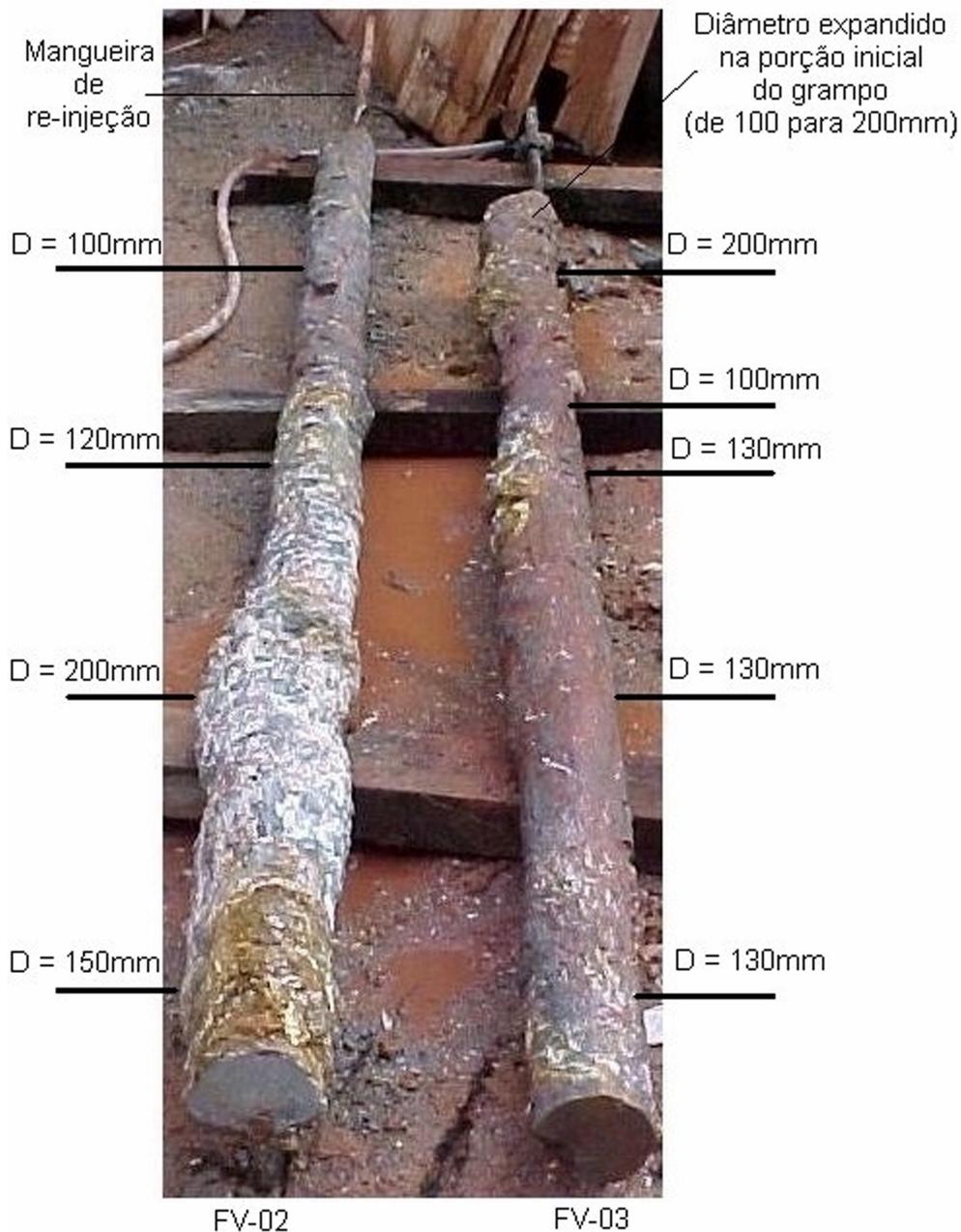


Figura 119 – Aspecto dos bulbos e diâmetros dos grampos exumados (FV-02 e FV-03)

Da Figura 119, observa-se que:

- (i) Os grampos são diferentes entre si, apesar da proximidade de instalação. Um estava do outro apenas 1m;
- (ii) O grampo FV-02 apresentou o trecho inicial com cerca de 1m de comprimento, com 100mm de diâmetro. Vizinho ao material mais quartzoso, o diâmetro do bulbo aumentou para cerca de 120mm, e atingiu seu maior valor (200mm), na região com pedregulhos de quartzo. A seguir, houve uma nova mudança de solo, e a conseqüente diminuição do bulbo para 150mm;
- (iii) O grampo FV-03 apresentou uma seção praticamente uniforme, com 130mm de diâmetro, nos 2m finais; um diâmetro de 100mm (igual ao da broca de perfuração) em um trecho com cerca de 1m; e um aumento de bulbo para cerca de 200mm de diâmetro, na parte inicial.
- (iv) A perfuração foi feita com uma broca de 100mm de diâmetro e a limpeza do furo realizada com ar comprimido. Pode-se inferir que os solos com partículas grandes foram triturados além do limite do diâmetro da broca. Os grãos pesados ficaram retidos no interior do furo e, ao se efetuar a injeção de preenchimento da bainha, este material granular se misturou à nata, criando bulbos de diâmetros maiores que o da broca.

Na Figura 120, observa-se a nítida mudança de diâmetro do grampo FV-02 ao se atravessar um solo com grãos de quartzo de até 3cm de aresta. Nesta figura pode-se também notar que os grãos de quartzo ficaram embebidos na nata.

A Figura 121 ilustra o aspecto da re-injeção, que forma uma película de nata sobre o grampo que sofreu exsudação. Não houve enraizamento da nata no solo, apenas a formação de uma película de nata sobre a anterior (de primeira injeção).

Ambos os grampos apresentaram padrão de fissuração transversal, constatando-se muitas fraturas diametrais ao longo de todo o comprimento (Figura 122 e Figura 123). Não houve vestígios de fraturamento longitudinal. As fraturas transversais encontradas evidenciam que o grampo (nata + aço) foi arrancado no contato nata/solo. Outra indicação de que os grampos FV-02 e FV-03 foram arrancados no contato nata/solo, foi a observação, no solo, de um

espaço vazio de cerca de 5cm, a partir da extremidade final dos grampos arrancados.



Figura 120 – Aspecto da re-injeção e diâmetro do bulbo para o grampo FV-02



Figura 121 – Aspecto da re-injeção e diâmetro do bulbo para o grampo FV-03



Figura 122 – Fissuras transversais encontradas no grampo exumado FV-03

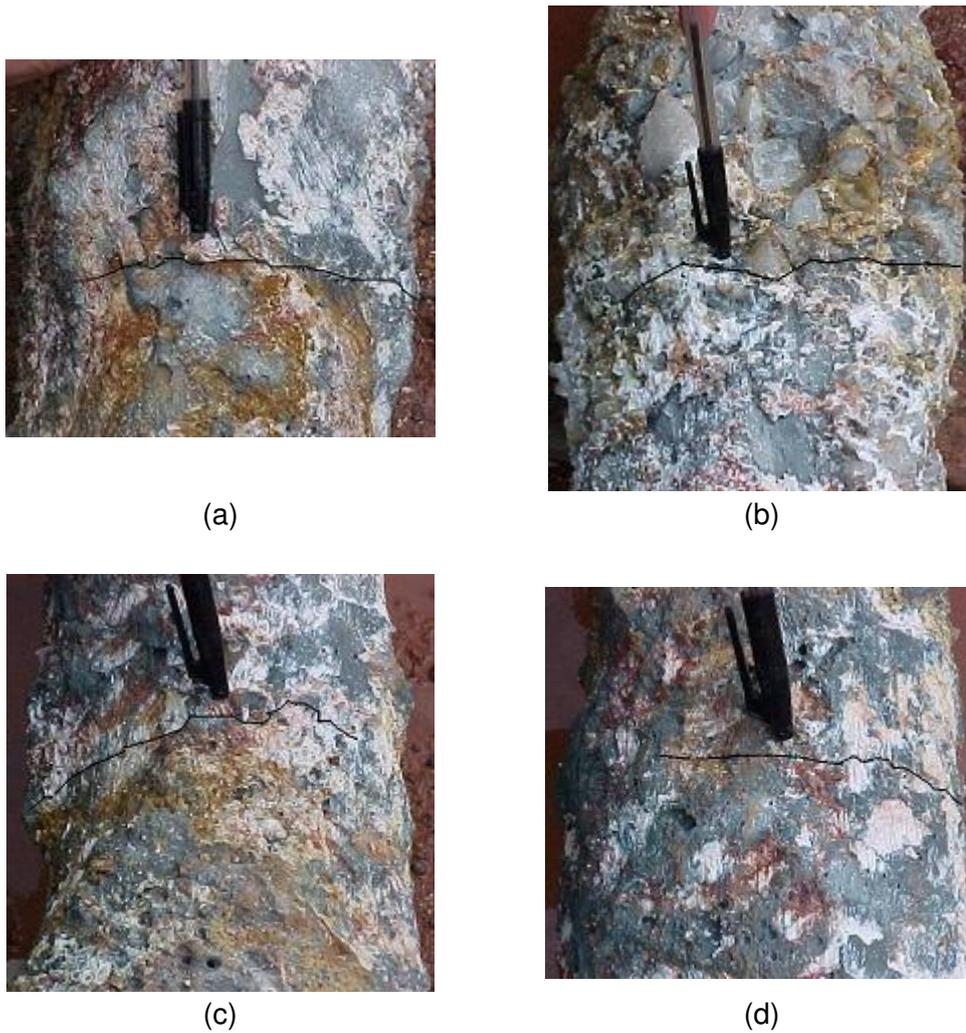


Figura 123 – Fissuras transversais encontradas no grampo exumado FV-02

Apesar dos grampos serem diferentes, por atravessarem solos distintos e por terem sido re-injetados de modos distintos (o primeiro por uma mangueira de re-injeção com válvulas manchetes FV-02 e, o outro, re-injetado pela boca FV-03), os resultados de q_s são muito parecidos.

7.2. Obra Museu 1 [M1]

Dois grampos (M1-19 e M1-20) foram submetidos a ensaios de arrancamento e posteriormente exumados.

O grampo M1-19 foi preparado com mangueira de polietileno da Jetplast com 9,5mm de diâmetro e 1mm de espessura, com válvulas a cada 50cm e mangueira de retorno da nata. Esta mangueira de retorno (localizada logo após o obturador de espuma, para garantia do trecho livre de 1m de comprimento) serve

para acusar o enchimento do furo, por meio do extravasamento da nata. O tempo de cura da nata de cimento até a re-injeção (Bainha + 1 injeção) foi de 3 horas. Ambos os grampos foram re-injetados: o M1-19 ao longo de seu comprimento pela mangueira de re-injeção com válvulas; e o M1-20 por meio da mangueira de retorno que, no caso, passou a ter uma segunda injeção (Bainha + 1 injeção) a partir do início do trecho injetado.

A Tabela 41 apresenta as características dos grampos M1-19 e M1-20 e a Tabela 42 resume os resultados dos ensaios de arrancamento, por meio da Força máxima de arrancamento (F_{max}), resistência ao arrancamento (q_s) e deslocamento de arrancamento ($\Delta L_{arrancamento}$) e cisalhamento ($\Delta L_{cisalhamento}$).

Tabela 41 – Características dos grampos M1-19 e M1-20

Grampo	Solo	Lavagem do furo	Número de injeções		Tempo de cura	Aço	Diâmetro da barra de aço	Diâmetro do furo	Inclinação do grampo
M1-19	6	Não	2	Re-injetado pela mangueira de retorno, no início do trecho injetado	3 dias	INCO-13D CA75	22mm ext 20mm int	3,5" ou 8,89cm	10°
M1-20	6	Não	2	Re-injetado pela mangueira de polietileno com válvulas a cada 50cm	3 dias	CA75	22mm ext 20mm int	3,5" ou 8,89cm	10°

Tabela 42 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos M1-19 e M1-20

Grampo	F_{max} [kN]	$\Delta L_{arrancamento}$ [mm]	$\Delta L_{cisalhamento}$ [mm]	q_s [kPa]
M1-19	173	-	25	206
M1-20	168	-	23	200

A Figura 124 apresenta as curvas Carga x Deslocamento dos ensaios de arrancamento M1-19 e M1-20.

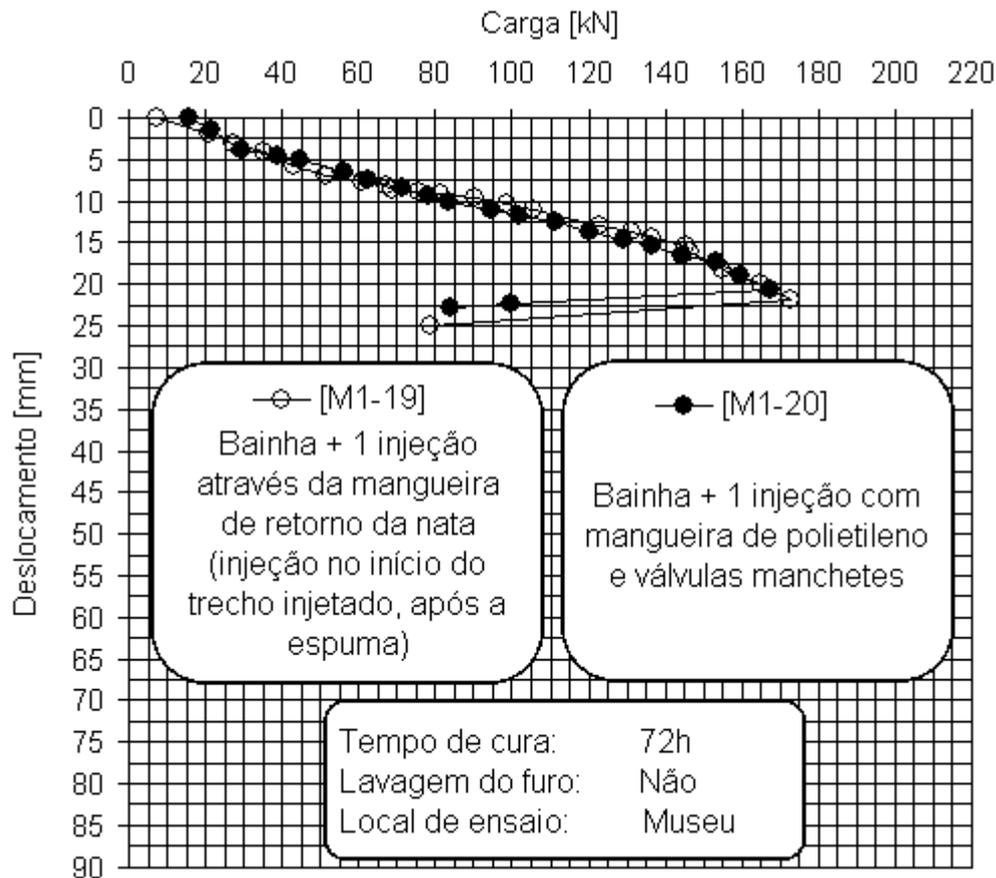


Figura 124 - Curvas Carga x Deslocamento dos grampos exumados M1-19 e M1-20

Os grampos apresentaram praticamente os mesmos resultados: deslocamento médio da ordem de 24mm até a ruptura, e diferença de 3% no valor de q_s . As curvas carga x deslocamento são praticamente coincidentes (Figura 124).

Durante a exumação, foram recolhidas amostras deformadas de solos ao longo do comprimento dos grampos (de 0,0m até 4,0m). Estes materiais foram caracterizados no laboratório, obtendo-se G_s , LL, LP, IP (Tabela 43 e Tabela 44) e histogramas de distribuição granulométrica ao longo do comprimento injetado do grampo (Figura 125 e Figura 126).

Tabela 43 – Resultados dos ensaios de laboratório do grampo M1-19

Posição ao longo do comprimento do grampo [m]	G _s Densidade real dos grãos	LL Limite de liquidez [%]	LP Limite de plasticidade [%]	IP Índice de plasticidade [%]
0,0	2,614	27,5	17,0	10,4
0,5	2,651	26,9	18,8	8,1
1,0	2,665	-	-	-
1,5	2,654	-	-	-
2,0	2,688	-	-	-
2,5	2,670	41,1	33,9	7,2
3,0	2,655	40,4	22,1	18,3
3,5	2,673	26,1	19,1	7,1
4,0	2,609	-	-	-

Tabela 44 – Resultados dos ensaios de laboratório do grampo M1-20

Posição ao longo do comprimento do grampo [m]	G _s Densidade real dos grãos	LL Limite de liquidez [%]	LP Limite de plasticidade [%]	IP Índice de plasticidade [%]
0,0	2,595	25,4	16,7	8,8
0,5	2,614	28,3	18,6	9,7
1,0	2,625	-	-	-
1,5	2,709	-	-	-
2,0	2,730	-	-	-
2,5	2,724	32,1	20,9	11,2
3,0	2,718	41,3	24,3	17,0
3,5	2,716	27,3	18,0	9,3
4,0	2,657	-	-	-

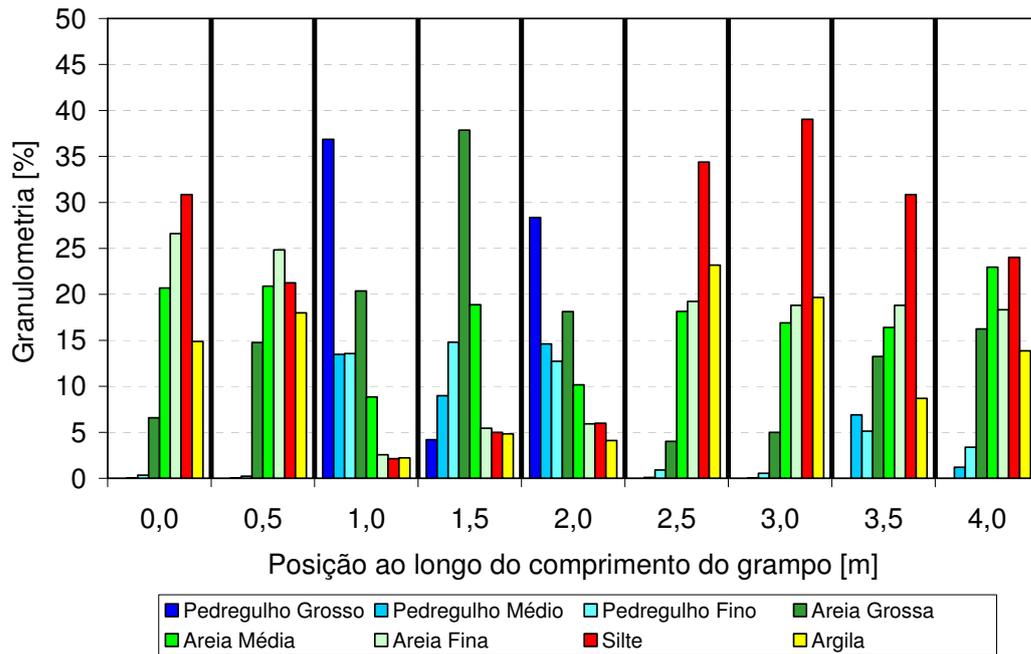


Figura 125 – Histograma de distribuição granulométrica do solo do grampo M1-19

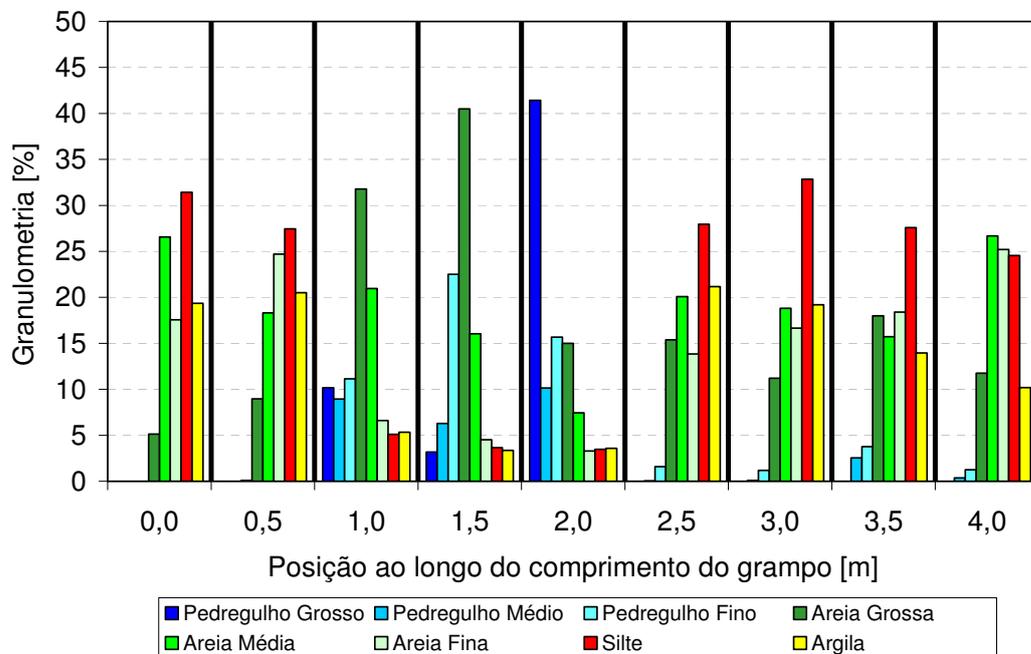


Figura 126 – Histograma de distribuição granulométrica do solo do grampo M1-20

Os histogramas de distribuição granulométrica de cada grampo demonstram a variabilidade de solos ao longo de cada grampo individualmente.

Os valores apresentados na Tabela 43, Tabela 44, Figura 125 e Figura 126 mostram que há poucas diferenças entre os grampos, os quais distavam apenas 0,50m entre si.

Os perímetros dos grampos foram medidos a cada 0,25m de distância ao longo do comprimento e os respectivos diâmetros então calculados. O intervalo de maior diâmetro é o situado entre 1,5m e 2,0m, onde foram encontradas concentrações de pedregulhos grossos e areias grossas (Figura 127).

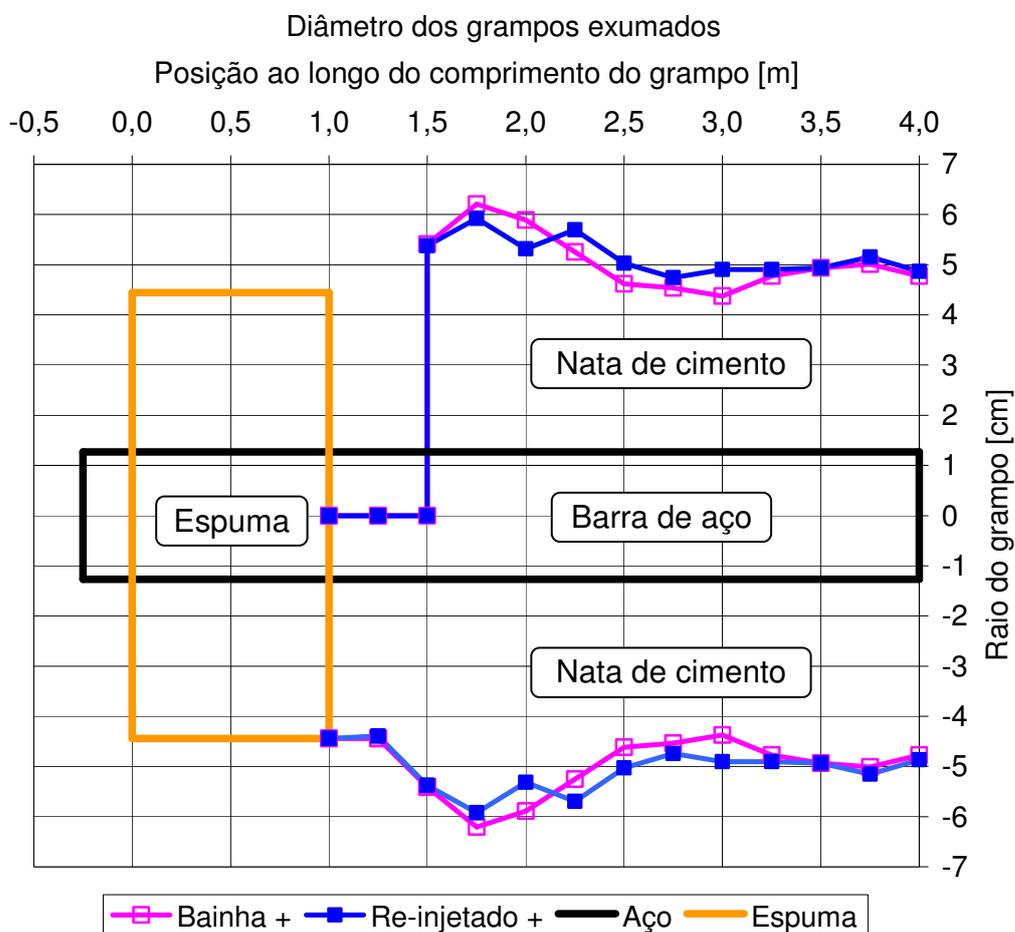


Figura 127 – Diâmetros ao longo dos grampos exumados M1-19 e M1-20

A espuma (obturador de nata) se mostrou ineficiente para o preenchimento do furo entre 1m e 1,5m. Logo após a espuma, a nata só conseguiu preencher a parte inferior do grampo. O *strain gage* inicial (SG 0) ficou semi-coberto por nata (Figura 128).

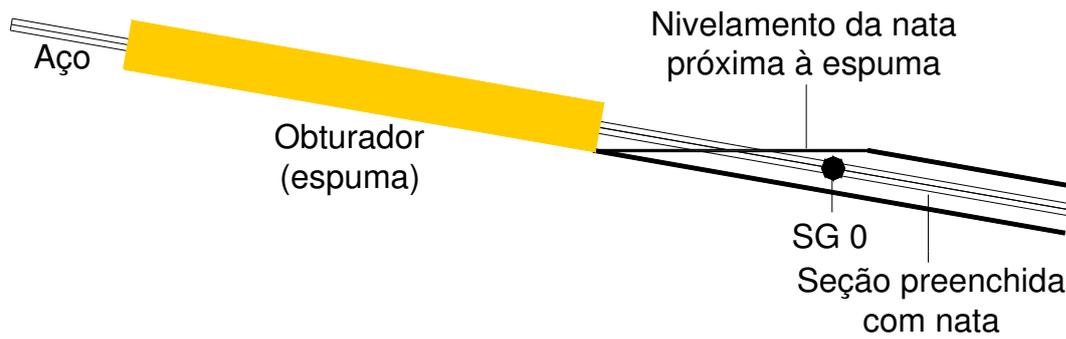


Figura 128 – Ineficiência da espuma no preenchimento total do furo com nata

Na Figura 129, pode-se visualizar que as pontas dos grampos eram formadas apenas por nata de cimento e que houve cisalhamento no início da região que continha o grampo. Observam-se também evidências de que o arrancamento se deu no contato barra/nata. A primeira prova é o decalque vermelho deixado pelas pontas das barras nas pontas dos grampos. A segunda prova é o evidente cisalhamento do aço na nata, deixando uma região circular de cisalhamento.



Figura 129 – Evidências do arrancamento no contato barra/nata

O aspecto de cada grampo, assim como os valores de diâmetros medidos a cada meio metro são apresentados na Figura 130 e na Figura 131. Estas fotos foram obtidas com as partes inferiores dos grampos voltadas para cima. Há uma incorporação de material da rocha alterada no bulbo. Materiais de granulometria mais grossa corresponderam a diâmetros maiores do grampo.

O padrão de fissuração apresentado pelos dois grampos é de fraturas longitudinais (Figura 132 e Figura 133), contrário ao observado nos grampos exumados da Fagundes Varela (FV-02 e FV-03) em que o padrão de fraturas foi transversal. As fraturas longitudinais predominaram, evidenciando o arrancamento no contato barra/nata, uma vez que a barra rasgou a nata na direção de deslocamento.

Os dois grampos, re-injetados, pela boca ou ao longo do comprimento, apresentaram regiões em que houve exsudação. Estas regiões são caracterizadas como natas brilhantes e de aspecto abatido, horizontalizadas. A exsudação prejudicou a obtenção de uma seção transversal plena de nata no interior do furo (Figura 132, entre 1,0 e 1,5m).

97,4mm		95,5mm
98,7mm		98,7mm
98,0mm		87,5mm
100,6mm		92,3mm
106,3mm		117,8mm
107,6mm		108,2mm
Nata na parte inferior do grampo		Nata na parte inferior do grampo
Trecho livre		Trecho livre
88,9mm		88,9mm
Trecho livre		Trecho livre
0mm		0mm
	[M1-20] [M1-19]	

Figura 130 – Diâmetros ao longo dos grampos M1-19 e M1-20 – de 0 a 4m

0mm		0mm
88,9mm		88,9mm
nata na parte inferior		nata na parte inferior
108,2mm		107,6mm
117,8mm		106,3mm
92,3mm		100,6mm
87,5mm		98,0mm
98,7mm		98,7mm
95,5mm		97,4mm
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> [M1-19] [M1-20] </div>	

Figura 131 – Diâmetros ao longo dos grampos M1-19 e M1-20 – de 4 a 0m

	M1-19 e M1-20	0,00m a 1,00m
	M1-19 e M1-20	1,00m a 1,50m
	M1-19 e M1-20	1,50m a 2,00m
	M1-19 e M1-20	2,00m a 2,50m
	M1-19 e M1-20	2,50m a 3,00m
	M1-19 e M1-20	3,00m a 3,50m
	M1-19 e M1-20	3,50m a 4,00m

Figura 132 – Fraturas, bulbo e exsudação dos grampos M1-19 e M1-20 - fotos do topo

	<p>M1-19 e M1-20</p>	<p>1,00m a 1,50m</p>
	<p>M1-19 e M1-20</p>	<p>1,50m a 2,00m</p>
	<p>M1-19 e M1-20</p>	<p>2,00m a 2,50m</p>
	<p>M1-19 e M1-20</p>	<p>2,50m a 3,00m</p>
	<p>M1-19 e M1-20</p>	<p>3,00m a 3,50m</p>
	<p>M1-19 e M1-20</p>	<p>3,50m a 4,00m</p>

Figura 133 –Fraturas, bulbo e exsudação dos grampos M1-19 e M1-20 - fotos da base

Muitas observações importantes sobre a aderência no contato barra-nata foram obtidas por meio de trabalhos teóricos e experimentais em concreto protendido realizados nos Estados Unidos. De acordo com Hanna (1982), estudos realizados por Lutz e Gergeley (1967) e Tepfers (1973) em barras planas de concreto protendido convencional confirmaram que, para barras lisas, inicialmente a resistência de aderência depende da adesão. Posteriormente à destruição desta adesão (deslizamento da barra em relação à nata), a resistência é desenvolvida pelo atrito entre a barra e a nata envolvente.

Na presente pesquisa, foram utilizadas barras INCO-13D (CA75), que possuem rosca em todo o comprimento (ranhuras muito próximas). Durante a exumação constatou-se que as barras M1-19 e M1-20, haviam perdido a rosca, ou seja, a nata de cimento preencheu as regiões entre nervuras e houve cisalhamento no contato entre a barra e a nata, ficando uma superfície lisa e sem vestígios de nervura. Este comportamento foi também verificado por Leonhardt e Mönning (1973) que concluíram que a forma e o espaçamento das asperezas é determinante no modo de ruptura apresentado: em interfaces onde as ranhuras estão muito próximas ocorre ruptura por cisalhamento do material entre as nervuras do elemento (Figura 134).

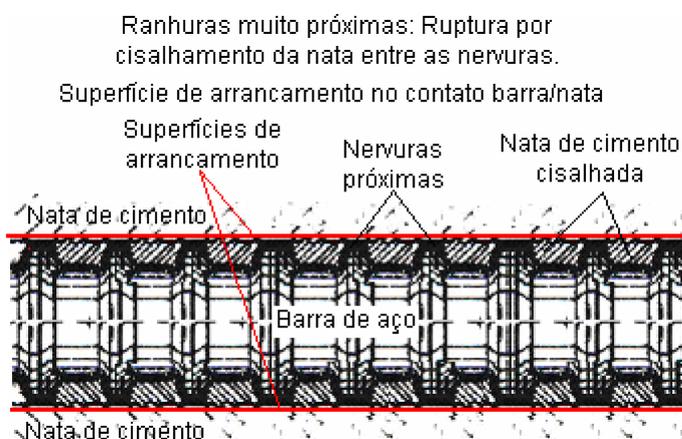


Figura 134 - Ruptura no contato barra/nata para ranhuras pouco espaçadas

Baseado em trabalhos experimentais realizados em maciço rochoso, Brown (1970) concluiu que a capacidade de arrancamento da ancoragem varia diretamente com a superfície lateral do bulbo ancorado e que a tensão de aderência última barra-nata está relacionada de maneira direta à resistência à compressão da nata. O autor propõe a seguinte relação para a tensão de aderência última (τ_{ult}) no contato barra-nata para barras lisas (Equação 15):

$$\tau_{ult.} = 0,17 \sqrt{C_o'}$$

Equação 15

sendo:

C_o' : resistência à compressão da nata

$\tau_{ult.}$: tensão de aderência última no contato barra-nata para barras lisas

A proposição de Brown (1970), apresentada na Equação 15, foi utilizada para a obtenção do valor da tensão de aderência última no contato barra-nata. Considerou-se como lisas, as barras dos grampos, em função da proximidade das ranhuras da barra CA75. Foram utilizados os resultados de ensaios de compressão uniaxial de corpos de prova cilíndricos de nata de cimento (Tabela 45) de mesmas características das utilizadas na presente pesquisa e que foram obtidos por Magalhães (2005).

Tabela 45 – Resistência à compressão uniaxial da nata de cimento (Magalhães, 2005)

Material	Corpo de prova	C_o' [MPa]
Nata de cimento	CC1	11,10
	CC2	11,11
	CC3	9,64
	CC4	10,96
Média:		10,70

Considerando o valor médio de resistência à compressão uniaxial da nata de cimento (10,70MPa) e a Equação 15, obtém-se uma tensão de aderência última do contato barra-nata igual a 556kPa. Este valor pode ser dividido pelo comprimento injetado do grampo, de forma a se obter a resistência ao arrancamento barra-nata por meio de Brown (1970), tal como se segue:

$$q_{s[\text{calculado}]} = \frac{\tau_{ult.}}{L_{injetado}} = \frac{556\text{kPa}}{2,75} = 202\text{kPa}$$

Equação 16

A média de resultados de q_s obtidos para os grampos M1-19 e M1-20 é de 203kPa, portando, a proposta de Brown (1970) é perfeitamente aplicável, pois o resultado de q_s calculado foi igual a 202kPa (Equação 16). Isto só vem a corroborar, mais uma vez, a evidência de que o cisalhamento ocorreu no contato barra-nata.