

8 Análises dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das calibrações das barras de aço instrumentadas, utilizadas para a execução dos grampos de arrancamento, além dos resultados dos ensaios de arrancamento, as avaliações correspondentes aos fatores de influência da resistência ao arrancamento e verificações das correlações empíricas da literatura.

O capítulo também reporta os resultados dos ensaios de laboratório executados em amostras obtidas de blocos indeformados, coletados ao longo da escavação do talude.

São apresentados os comportamentos mecânicos típicos obtidos a partir da campanha de 25 ensaios de arrancamento. A análise individual de comportamento de cada ensaio é apresentada no Apêndice 1 (Resultados dos ensaios de arrancamento), onde se encontram as curvas Carga x Deslocamento na cabeça do grampo e os gráficos de distribuição de carga ao longo do grampo.

Em particular, são apresentados resultados da influência de parâmetros tais como o tempo de cura da calda de cimento, o número de injeções, a lavagem do furo e o tipo de solo sobre a resistência ao arrancamento [q_s].

8.1. Calibrações dos grampos instrumentados

Foram realizados ensaios de tração direta nas barras de aço instrumentadas, com a finalidade de se verificar o comportamento tensão-deformação do sistema de medidas utilizado para monitoramento dos ensaios de arrancamento dos grampos no campo.

As calibrações foram executadas em duas barras de aço CA75, com cinco *strain gages* cada, correspondentes aos grampos M2-01 e M2-02, posteriormente instaladas no campo.

As calibrações foram executadas em ciclos de carregamento e descarregamento, monitorados por meio de *strain gages* das barras, extensômetro mecânico e manômetro do macaco hidráulico.

No programa de aquisição de dados, foram armazenados os dados de voltagem da célula de carga e dos extensômetros elétricos colados à barra de aço. O carregamento/d Descarregamento foi aplicado por meio de estágios de 1MPa (10kgf/cm²), correspondente a 8,2kN (840kgf) de força de tração. Entre estágios sucessivos de carga, aguardava-se o período de tempo necessário para a estabilização das deformações ao longo da barra.

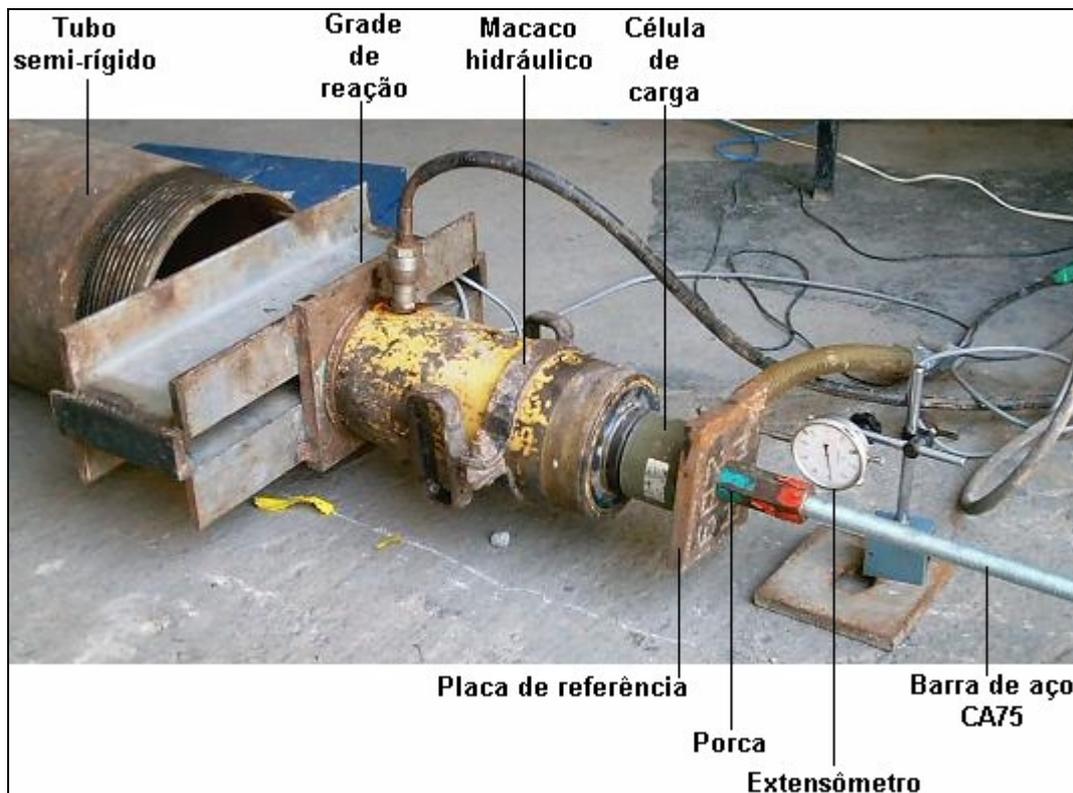


Figura 135 – Detalhe da montagem do equipamento para calibração das barras de aço

As curvas Deslocamento [mm] x Carga [kN] das calibrações (Figura 136 e Figura 137), apresentam três etapas: Ajuste (carregamento preliminar), Descarregamento e Carregamento. É possível perceber que, durante o carregamento preliminar, há um ajuste do sistema de montagem do ensaio. As curvas de descarregamento e de carregamento da calibração são lineares e praticamente coincidentes. Assim, as equações de calibração de cada *strain gage* foram calculadas a partir do resultado dos dados do carregamento da calibração. As demais curvas das calibrações são apresentadas no Apêndice 2.

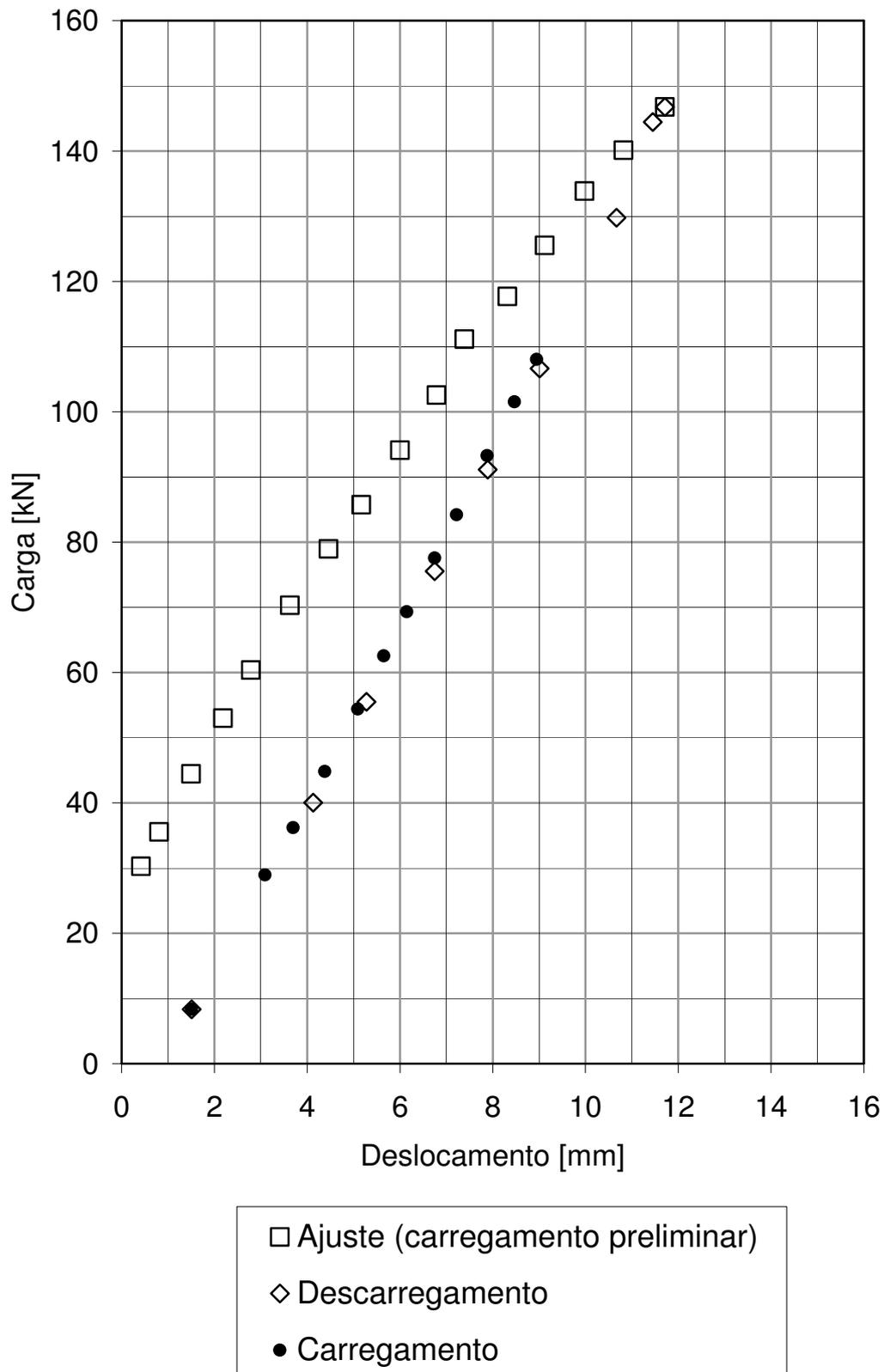


Figura 136 – Curvas de calibração da barra de aço instrumentada M2-01

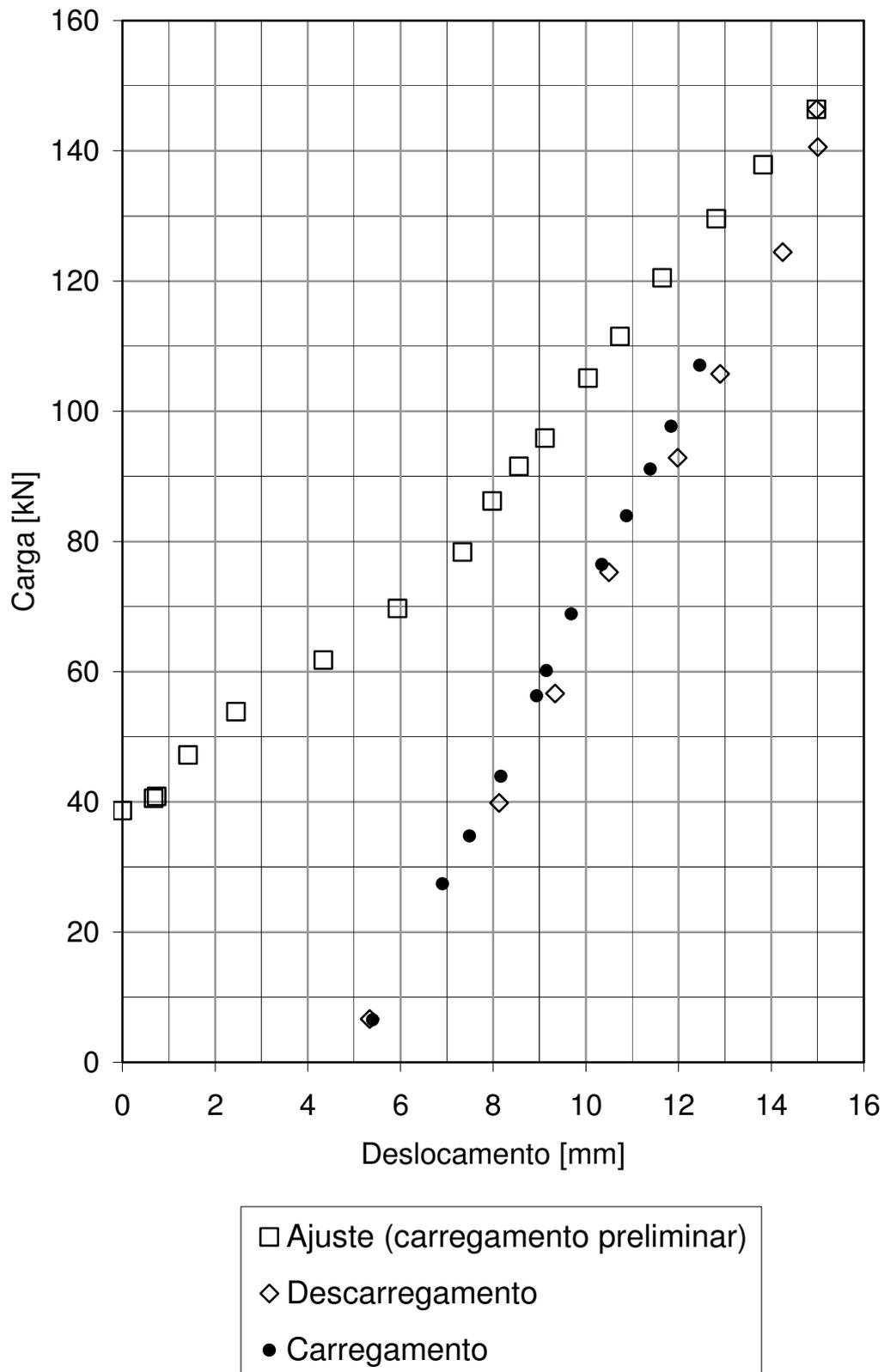


Figura 137 – Curvas de calibração da barra de aço instrumentada M2-02]

A Figura 138 e a Figura 139 apresentam as curvas de deformação dos *strain gages* [10^{-6}] x carga [kN] das calibrações das barras de aço M2-01 e M2-02, respectivamente, para a condição de carregamento.

Por meio das calibrações pode-se definir uma correlação entre carga e deformação para cada *strain gage*. Desta forma, pode-se levar em consideração fatores intrínsecos ao processo de instrumentação que afetam as condições ideais de trabalho (Proto Silva, 2005):

- Ocorrência de bolhas de ar no contato *strain gage* / barra;
- Interferência na corrente de alimentação devido ao contato entre os cabos de transmissão e a barra;
- Isolamento elétrico inadequado;
- Alinhamento incorreto dos *strain gages* a colagem;
- Ocorrência de umidade no contato do *strain gage*;
- Rugosidade da superfície de contato.

Na calibração, foram impostos valores conhecidos de carga [F] e medidas as deformações [ϵ] correspondentes dos *strain gages*. Por meio da análise de cada calibração e dos respectivos ajustes lineares ($F = k \cdot \epsilon$) exibidos na Figura 138 e na Figura 139, foram obtidos os valores das constantes de correlação [R] para cada *strain gage* (Tabela 46). Com base na lei de Hooke e conhecendo-se o valor do módulo de elasticidade do aço [E], pode-se calcular os valores teóricos da área da seção transversal e do diâmetro da barra de aço. Estes valores estão também listados na Tabela 46.

Tabela 46 – Resultados das calibrações das barras 1 e 2

Calibração (barra nº)	<i>Strain gage</i> (nº)	K = E.A	E _{aço}	Área calculada	Diâmetro calculado
		[kN]	[GPa]	[m ²]	[mm]
1	0	0,0484	210	2,30E-04	17,1
	1	0,0437		2,08E-04	16,3
	2	0,0472		2,25E-04	16,9
	3	0,0496		2,36E-04	17,3
	4	0,0450		2,14E-04	16,5
2	0	0,0335		1,64E-04	14,3
	1	0,0364		1,79E-04	14,9
	2	0,0386		1,89E-04	15,3
	3	0,0551		2,59E-04	18,3
	4	0,0438		2,13E-04	16,3
Média		0,0441		2,12E-04	16,3

Durante os trabalhos de instrumentação, foram medidos os diâmetros usinados de algumas barras. Os valores encontrados medidos situaram-se entre 15 e 19mm, mesma faixa correspondente aos valores calculados para os diâmetros das barras. O diâmetro médio calculado foi de 16,3mm (Tabela 46).

A fim de se obter uma única constante de calibração para transformação das variações de leituras (mV) em deformação específica, foi calculada a média entre todos os resultados dos ensaios referentes ao carregamento de calibração, definindo-se a seguinte equação de calibração (Equação 17):

$$F(\text{kN}) = A E \varepsilon = K \varepsilon = 4,41.10^{-2} \varepsilon \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

- 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];
- K: Constante de correlação (K = E.A.) [kN].
- ε : Deformação [10⁻⁶]

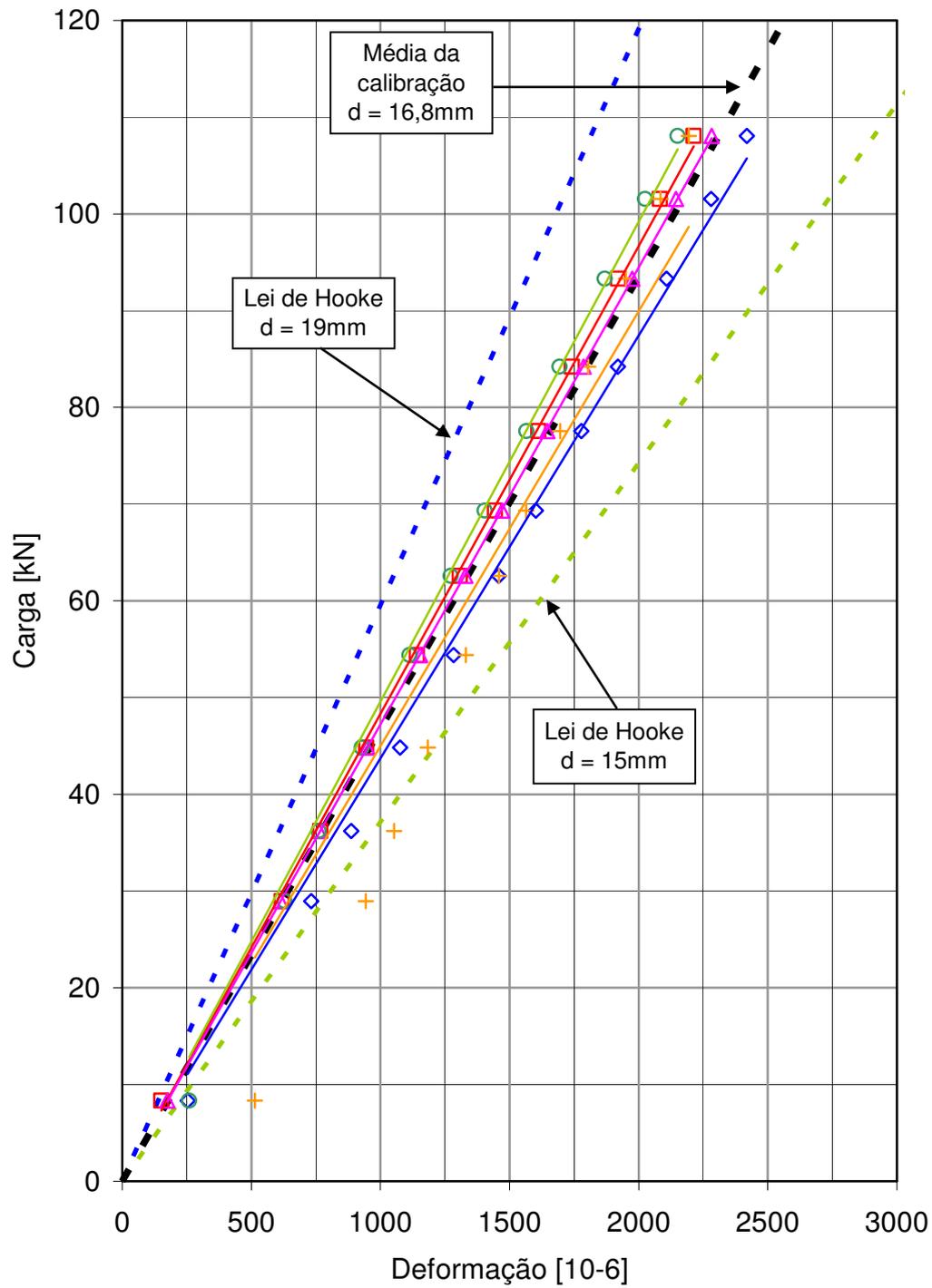


Figura 138 - Curvas de Deformação x Carga da calibração da barra M2-01

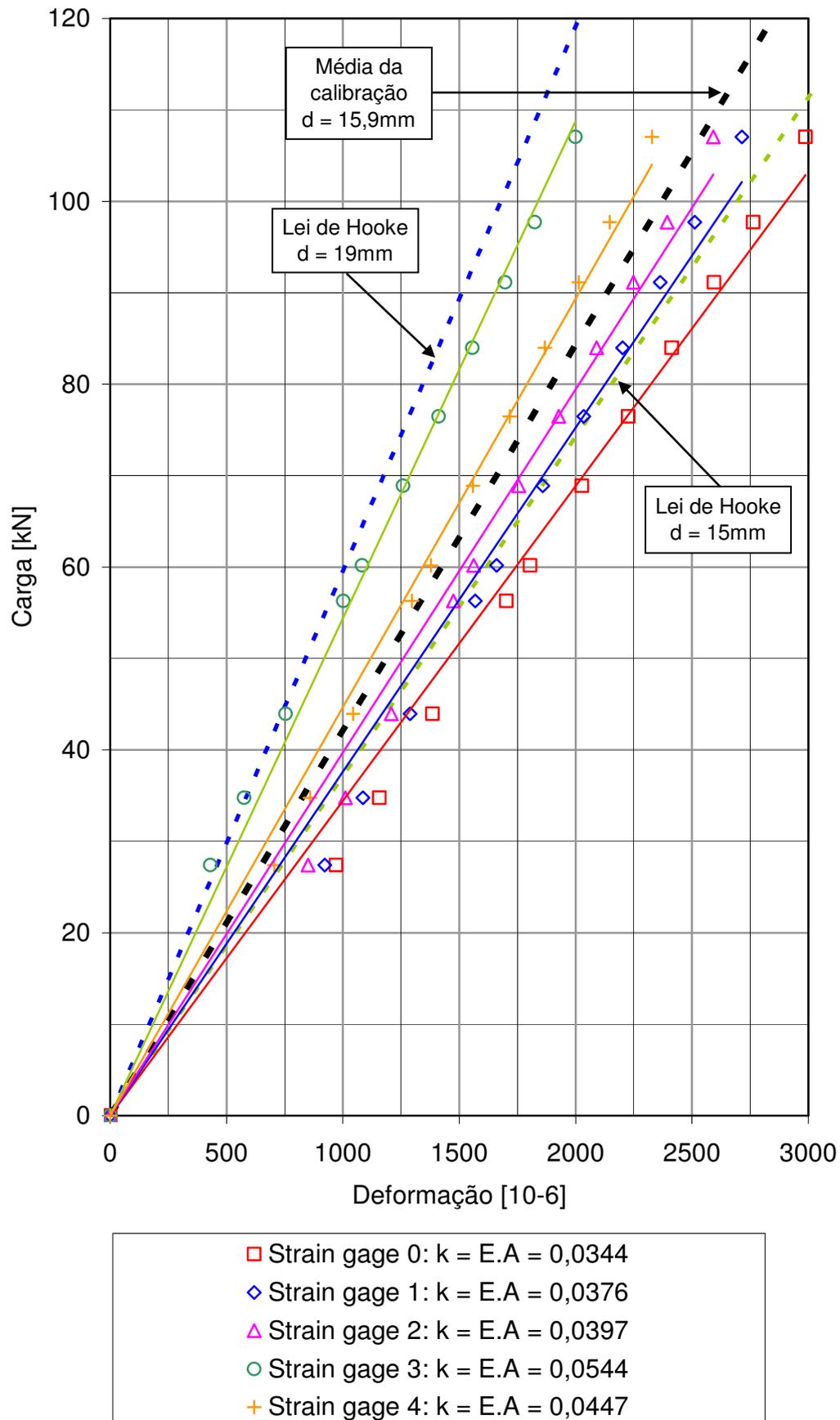


Figura 139 - Curvas de Deformação x Carga da calibração da barra M2-02

8.2. Ensaio de laboratório

O programa experimental de laboratório envolveu os seguintes ensaios:

- Caracterização: granulometria, limites de consistência e densidade real dos grampos;
- Cisalhamento direto: corpos de prova na umidade natural e submersos;
- Ensaio de rampa.

Foram utilizados três blocos cúbicos de amostras indeformadas (correspondentes às obras da Fagundes Varela, Museu 1 e Museu 2), com 30cm de aresta. Os blocos foram retirados nas áreas vizinhas aos furos de instalação dos grampos, conforme apresentada no Capítulo 5 (Figura 42 e Figura 44).

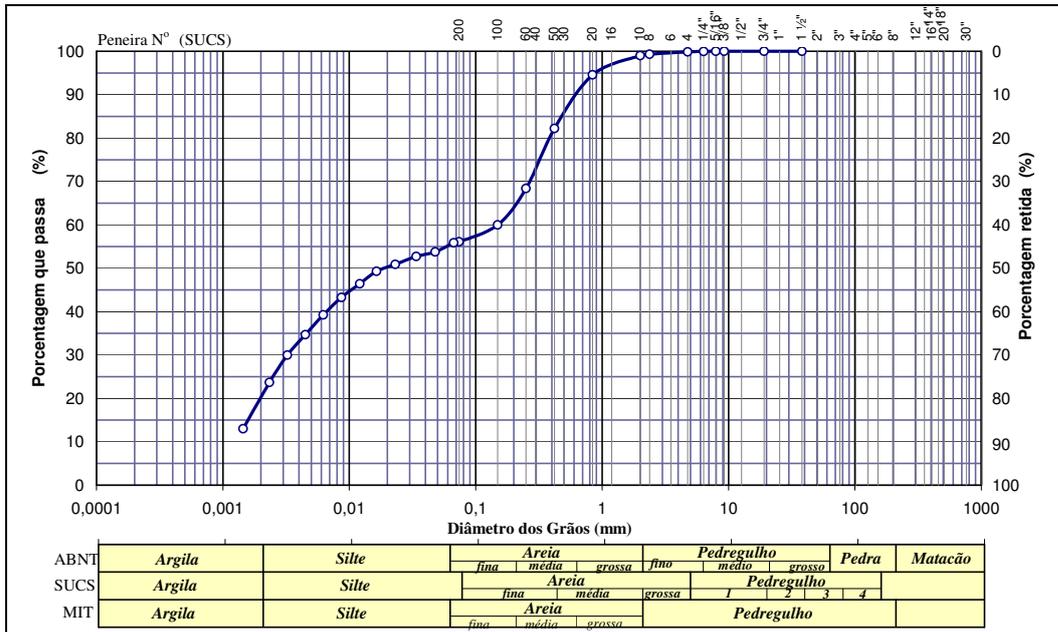
Os ensaios de caracterização foram realizados seguindo os procedimentos sugeridos pela NBR 6457 (Preparação de amostras), NBR 7181 (Análise granulométrica), NBR 6508 (Densidade real dos grãos), NBR 6459 (Limite de liquidez) e NBR 7180 (Limite de plasticidade).

8.2.1. Amostras da obra Fagundes Varela

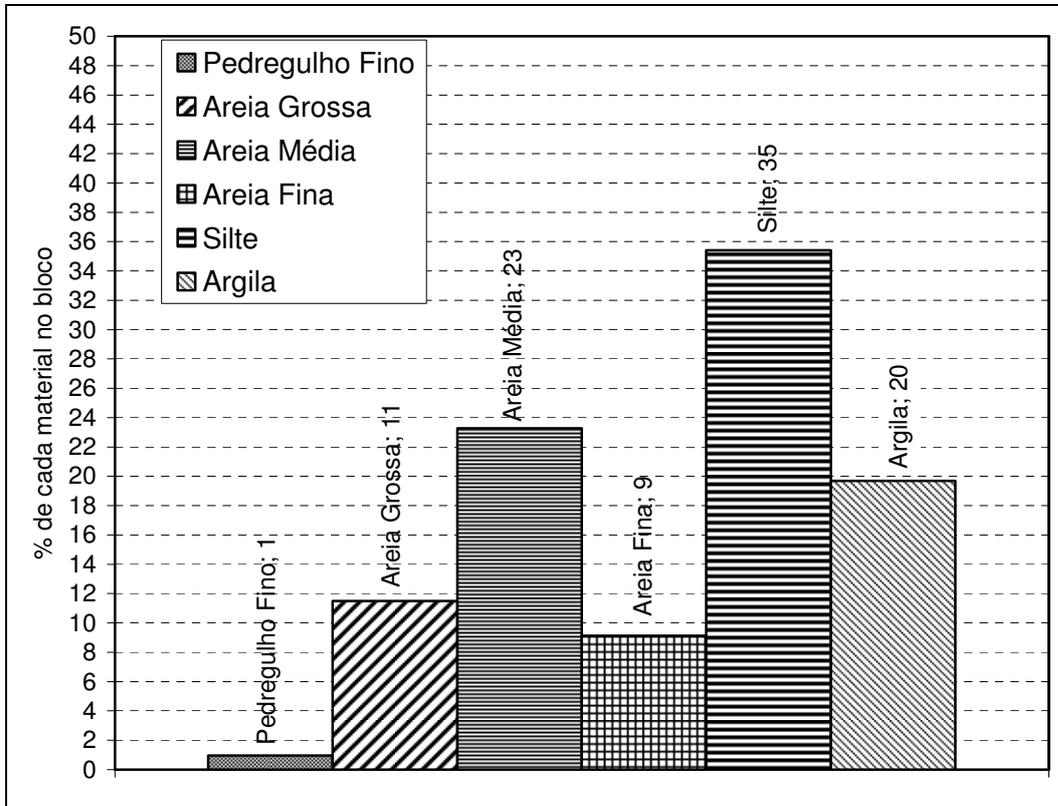
Os resultados dos ensaios de laboratório do bloco da Fagundes Varela (FV) são representativos dos grampos denominados FV-02 e FV-03. São apresentados os resultados dos ensaios de caracterização (Tabela 47), a curva granulométrica e o histograma de distribuição granulométrica (Figura 140), as curvas Deslocamento horizontal x Tensão e Deslocamento horizontal x Deformação volumétrica (Figura 141), obtidas dos ensaios de cisalhamento direto e as envoltórias de resistência (Figura 142).

Tabela 47 – Resumo das características do solo do bloco proveniente da FV

Símbolo	Definição	Valor	Unidade
γ_{nat}	Peso específico natural	17,7	kN/m ³
ϕ_{nat}	Ângulo de atrito da amostra natural	23,9	Graus
c_{nat}	Coesão da amostra natural	40,6	kPa
ϕ_{sub}	Ângulo de atrito da amostra submersa	23,3	Graus
c_{sub}	Coesão da amostra submersa	15,5	kPa
G_s	Densidade real dos grãos	2,716	-
LL	Limite de Liquidez	54,5	%
LP	Limite de Plasticidade	29,9	%
IP	Índice de Plasticidade	24,6	%

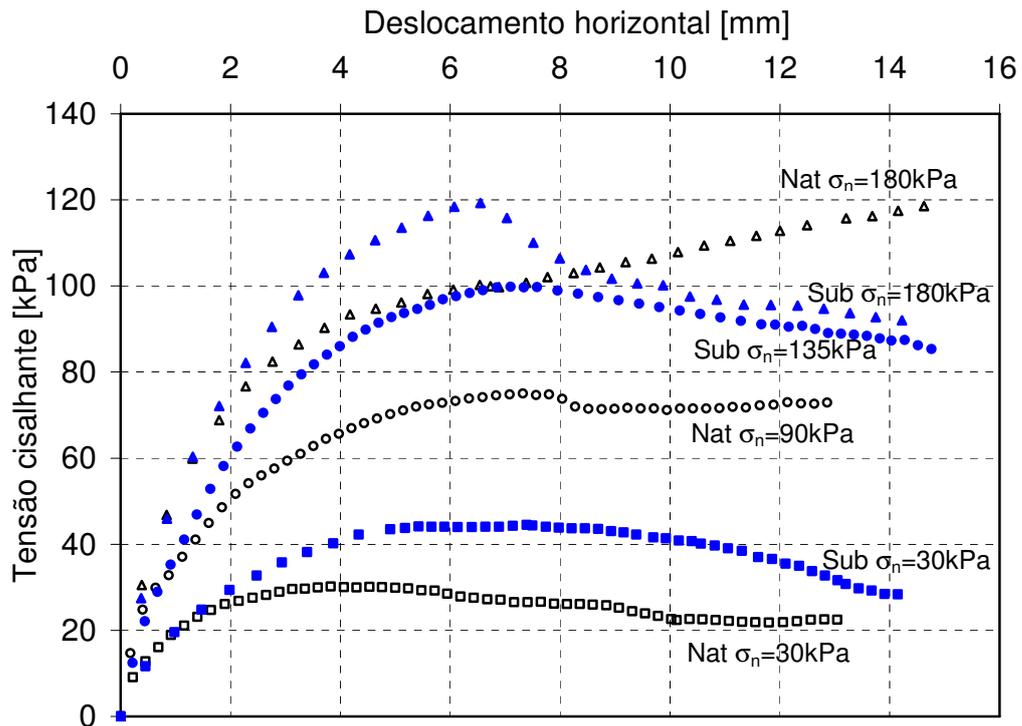


a) Curva granulométrica

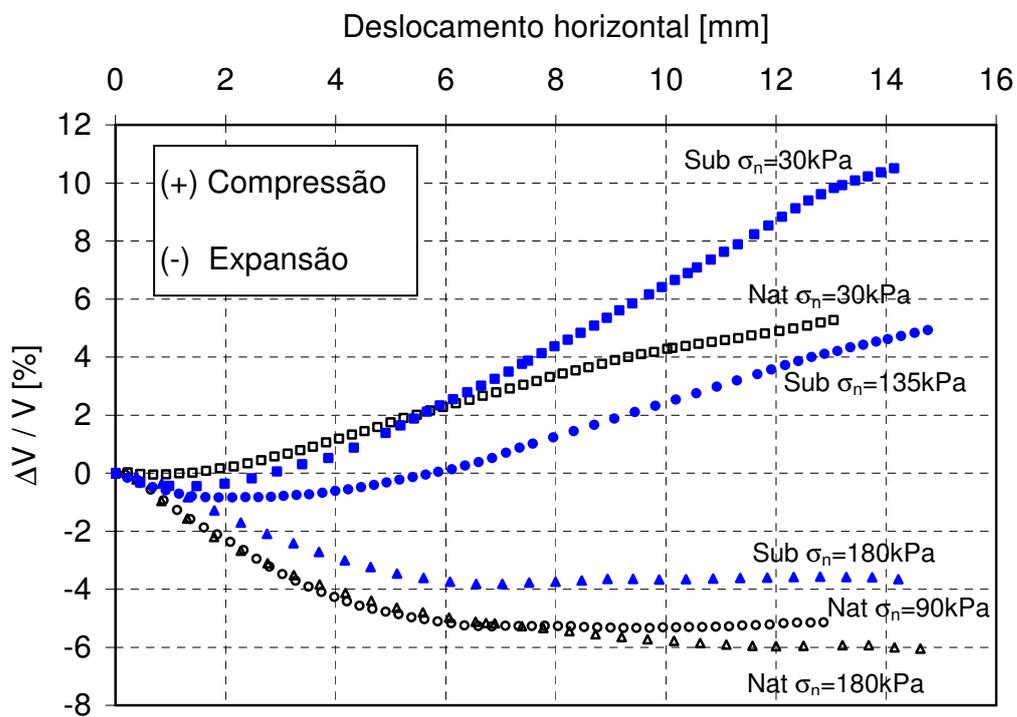


b) Histograma

Figura 140 – Distribuição granulométrica do solo da Fagundes Varela



(a) Deslocamento horizontal x Tensão



(b) Deslocamento horizontal x Deformação volumétrica

Figura 141 – Curvas do ensaio de cisalhamento direto – Solo da Fagundes Varela

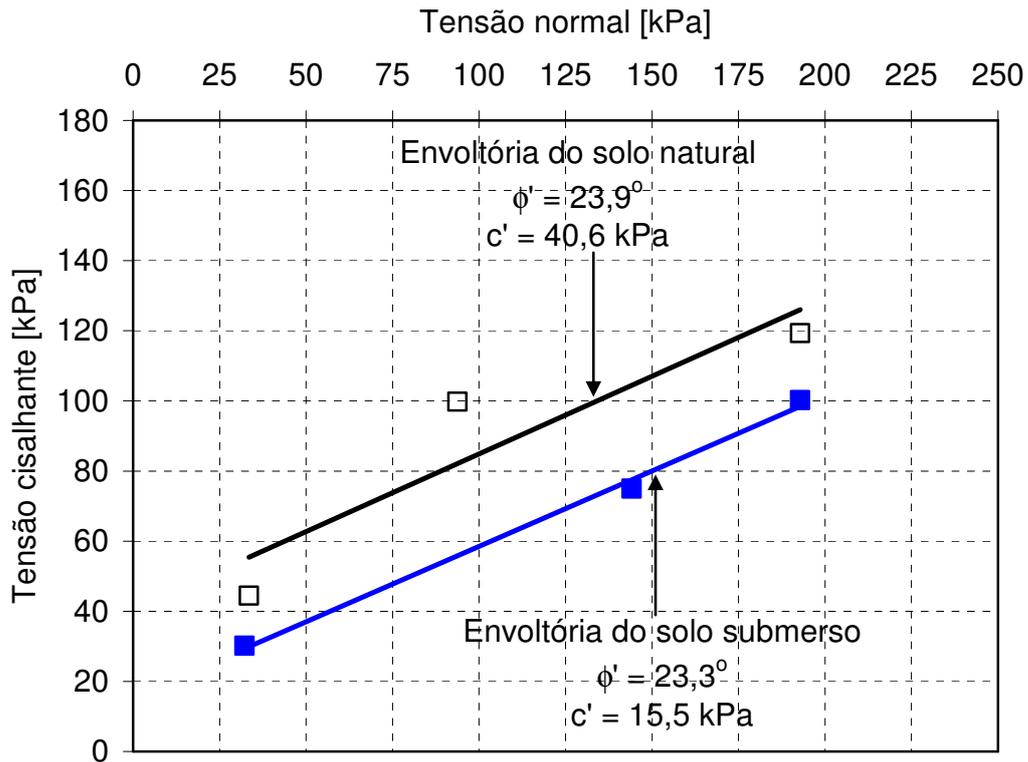


Figura 142 – Envoltórias de resistência do solo da Fagundes Varela

O Solo 2 apresenta peso específico de $17,7 \text{ kN/m}^3$, coesão e ângulo de atrito natural iguais a $15,5 \text{ kPa}$ e $23,3^\circ$, respectivamente. O histograma de distribuição do solo aponta predominância de silte com cerca de 35%. Os resultados são característicos de um solo residual jovem.

8.2.2. Amostras da obra Museu 1

Os resultados dos ensaios de laboratório do bloco do Museu 1 são representativos dos grampos de M1-01 até M1-10.

São apresentados os resultados dos ensaios de caracterização (Tabela 48), as envoltórias de resistência (Figura 143), a curva granulométrica e o histograma de distribuição granulométrica (Figura 144), as curvas Deslocamento horizontal x Tensão e Deslocamento horizontal x Deformação volumétrica (Figura 145), dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 48 – Resumo das características do solo do bloco proveniente do Museu 1

Símbolo	Definição	Valor	Unidade
γ_{nat}	Peso específico natural	17,6	kN/m ³
ϕ_{nat}	Ângulo de atrito da amostra natural	32,8	Graus
c_{nat}	Coesão da amostra natural	19,0	kPa
ϕ_{sub}	Ângulo de atrito da amostra submersa	31,8	Graus
c_{sub}	Coesão da amostra submersa	0,0	kPa
G_s	Densidade real dos grãos	2,714	-
LL	Limite de Liquidez	44,7	%
LP	Limite de Plasticidade	27,9	%
IP	Índice de Plasticidade	16,8	%

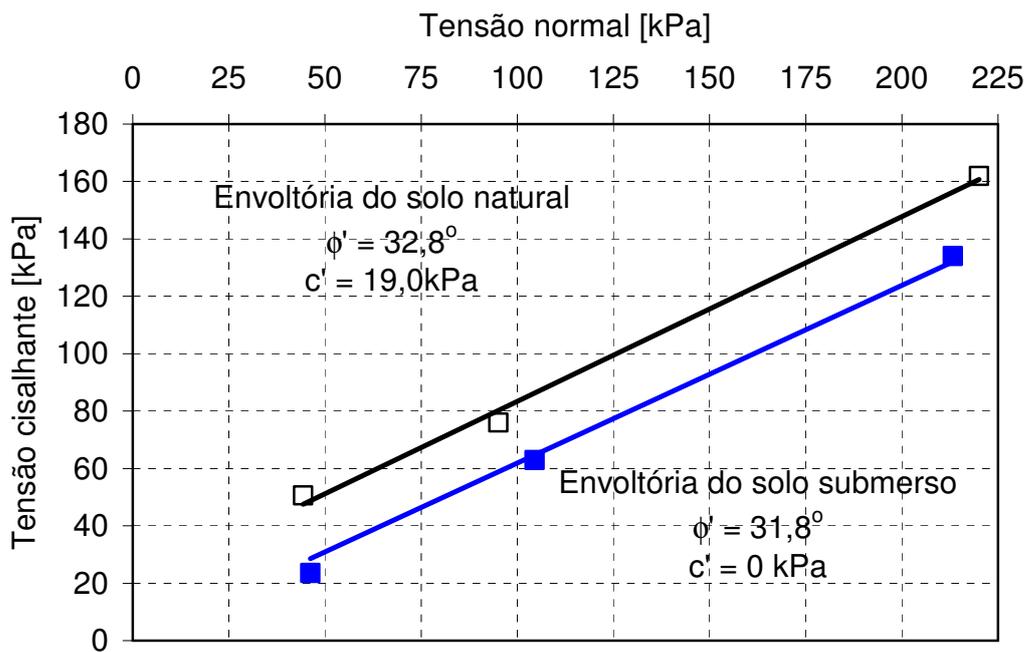
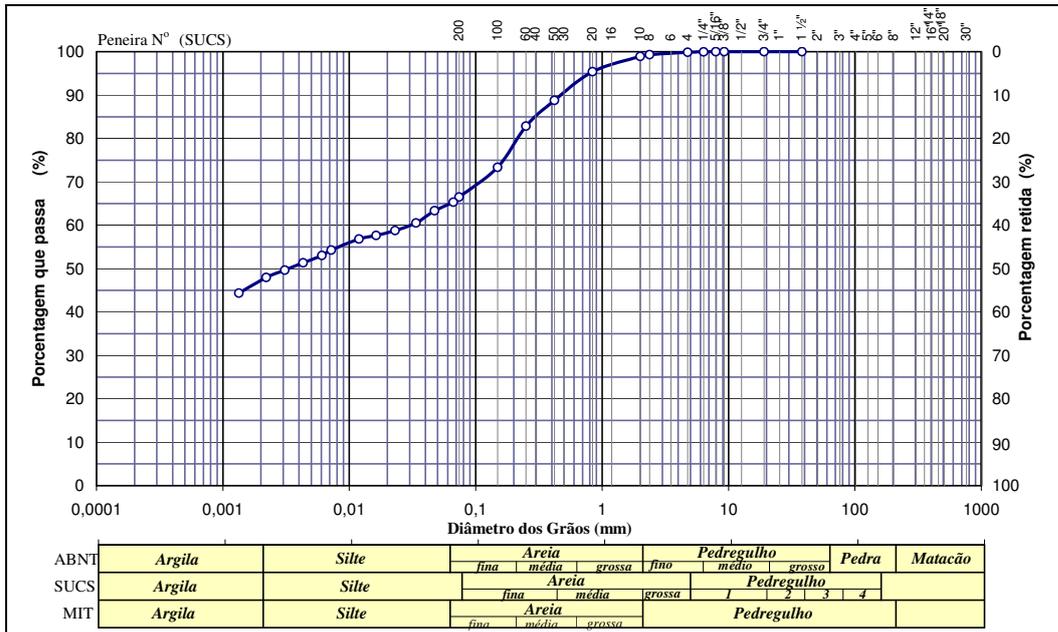
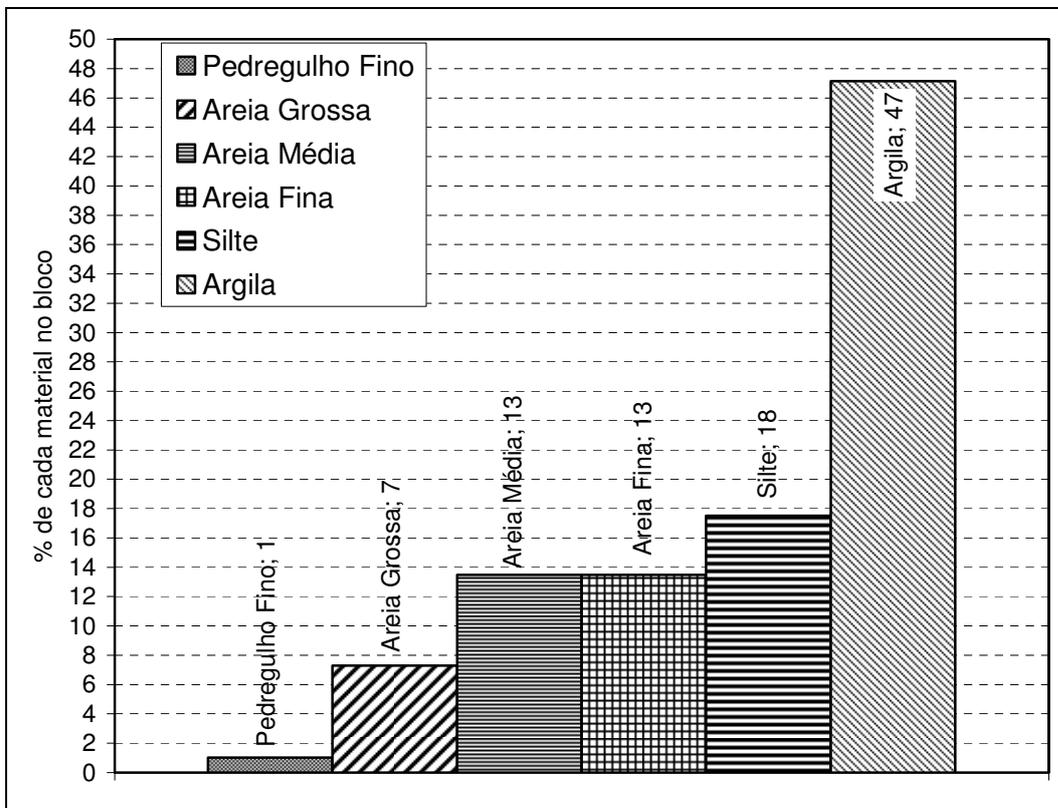


Figura 143 – Envoltórias de resistência do solo do Museu 1

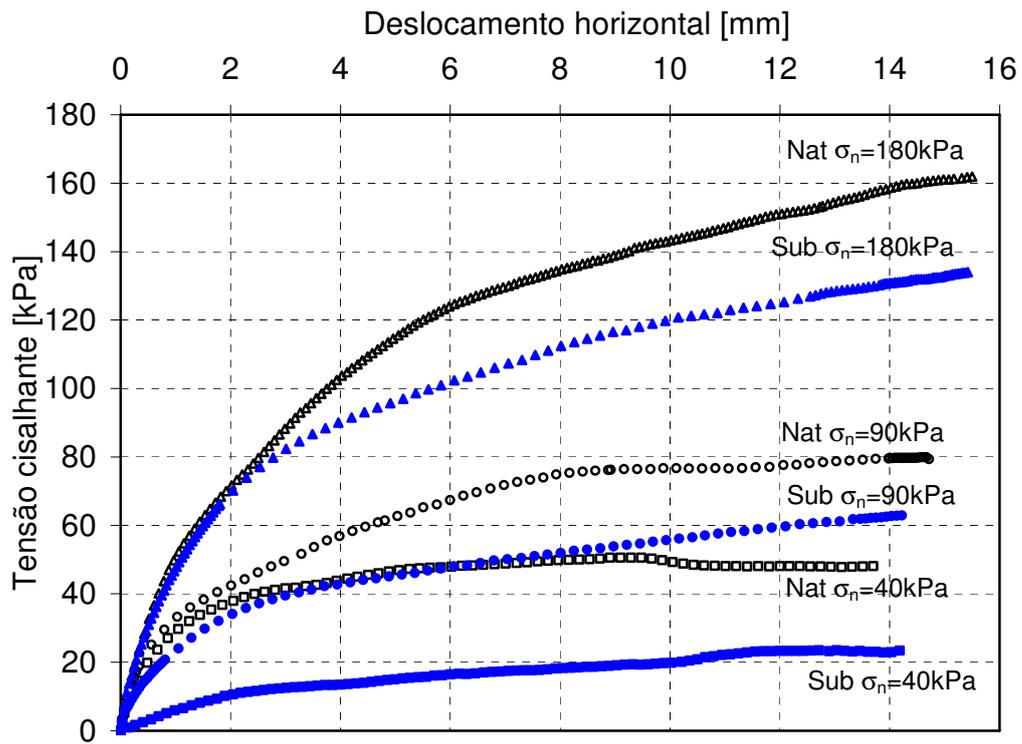


a) Curva granulométrica

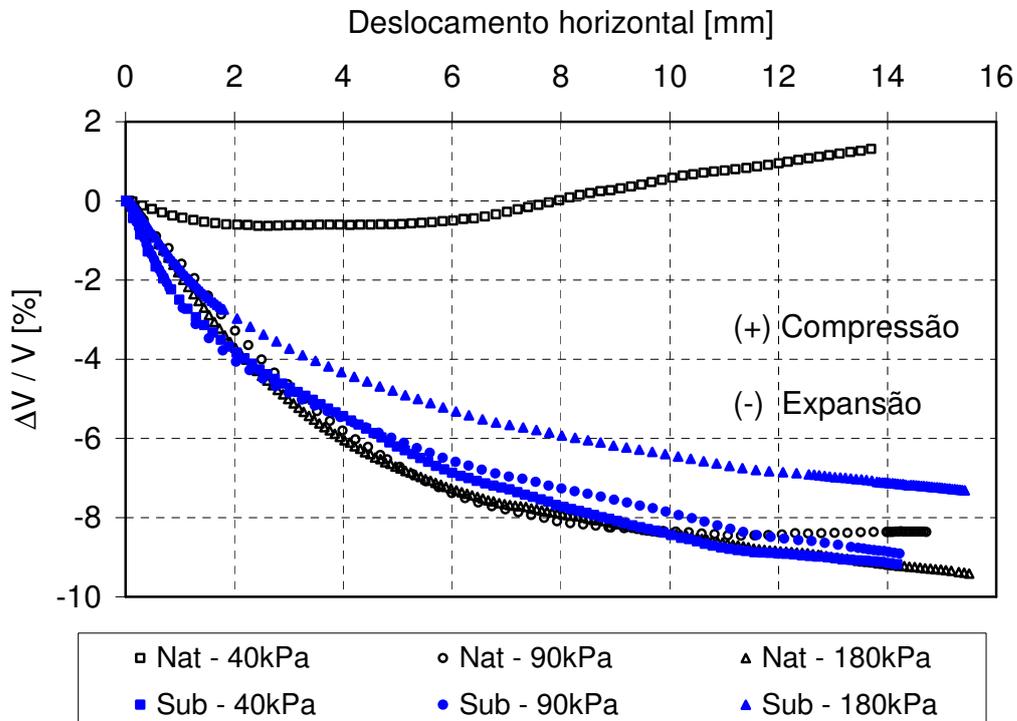


b) Histograma

Figura 144 – Distribuição granulométrica do solo do Museu 1



(a) Deslocamento horizontal x Tensão



(b) Deslocamento horizontal x Deformação volumétrica

Figura 145 – Curvas do ensaio de cisalhamento direto – Solo do Museu 1

O Solo 3 apresenta peso específico de $17,6\text{kN/m}^3$, coesão e ângulo de atrito natural iguais a $19,0\text{kPa}$ e $32,8^\circ$, respectivamente. O histograma de distribuição do solo aponta predominância de argila com cerca de 47%. Os resultados são característicos de um solo residual maduro.

Na Tabela 49 estão resumidos os resultados dos ensaios de rampa, realizados por Gomes Silva (2006), que correspondem aos ensaios de arrancamento M1-15 a M1-20 (Solo 5). Os ensaios de caracterização nos grampos M1-19 e M1-20 estão apresentados no Capítulo 7, de exumação dos grampos.

Tabela 49 – Ensaio de Rampa (adaptado de Gomes Silva, 2006)

Número do ensaio	M1-15 a M1-18			M1-19 e M1-20	
	A	B	C	A	B
Cota [m]	34,5			31,0	
Solo	5 (Solo residual jovem)			6 (Rocha alterada)	
Litotipo	Gnaiss bandado, moderadamente alterado			Intercalação de gnaiss e quartzito	
Localização	Aba direita da escavação			Na frente de escavação	
Peso da amostra [kgf]	20,8			9,3	
Posição de ensaio	Deitada, com superfície de ruptura no bandejamento gnáissico.			Deitada	
Ângulo inicial	12°	10°	9°	10°	7°
Ângulo de ruptura	46°	38°	36°	35°	35°
Junta	Com presença de raízes			Sem preenchimento	
JRC	Entre 8 e 10			Entre 6 e 8	

Na Tabela 49 reporta-se o ângulo inicial correspondente ao ângulo em que as superfícies superior e inferior da amostra começam a se movimentar, o ângulo de ruptura, correspondente ao ângulo em que as superfícies superior e inferior se separam completamente, havendo ruptura e o coeficiente de rugosidade da superfície (JRC) Barton e Choubey (1977), esquematizado Figura 146.

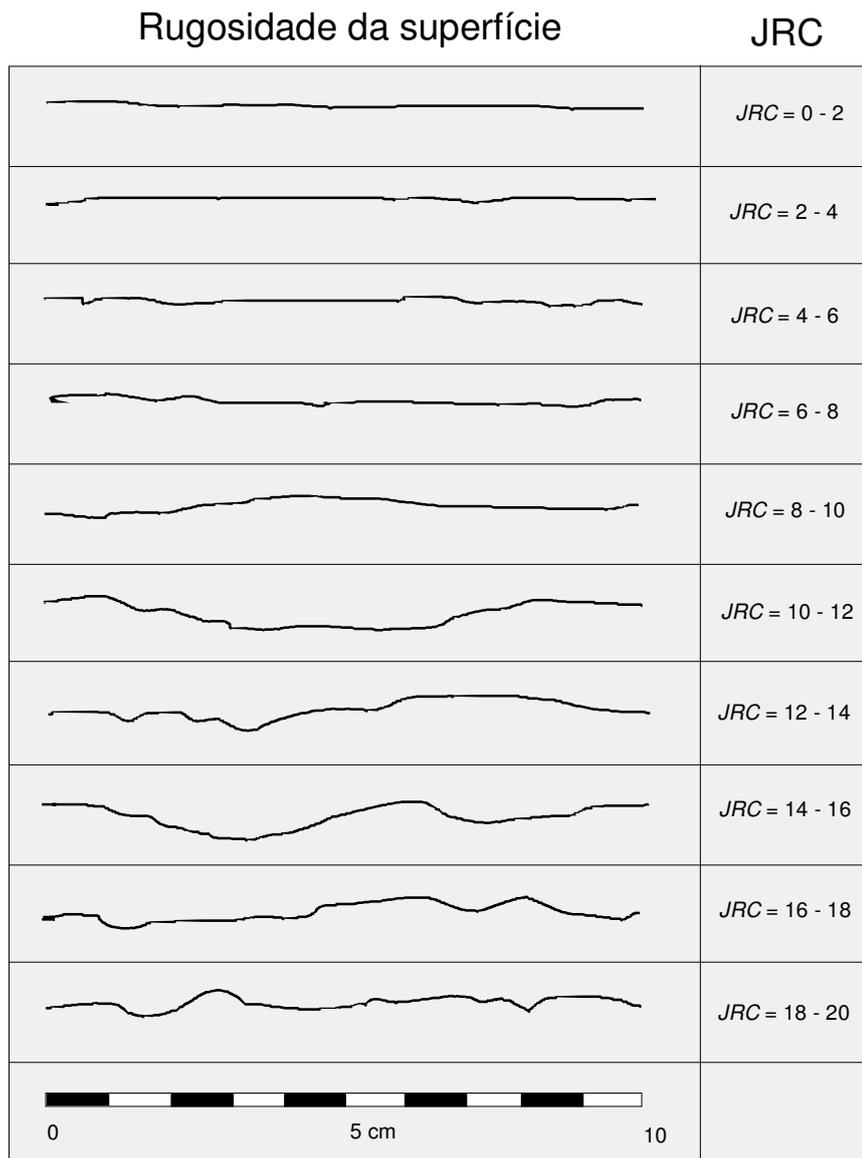


Figura 146 – Valores do coeficiente de rugosidade da junta - JRC (Barton e Choubey, 1977)

8.2.3. Amostras da obra Museu 2

Os ensaios de laboratório do bloco do Museu 2 são representativos dos grampos M2-01 e M2-02.

Os resultados dos ensaios de caracterização estão resumidos na Tabela 50. Apresenta-se também a curva granulométrica (Figura 147), as curvas dos ensaios de cisalhamento direto (Figura 148 e Figura 149) e as envoltórias de resistência (Figura 150).

Tabela 50 – Resumo das características do solo do Museu 2 (Proto Silva, 2005)

Símbolo	Definição	Valor	Unidade
γ_{nat}	Peso específico natural	16,6	kN/m ³
ϕ_{nat}	Ângulo de atrito da amostra natural	29,6	Graus
c_{nat}	Coesão da amostra natural	36,4	kPa
ϕ_{sub}	Ângulo de atrito da amostra submersa	24,9	Graus
c_{sub}	Coesão da amostra submersa	22,3	kPa
G_s	Densidade real dos grãos	2,69	-
LL	Limite de Liquidez	33,2	%
LP	Limite de Plasticidade	17,5	%
IP	Índice de Plasticidade	15,8	%

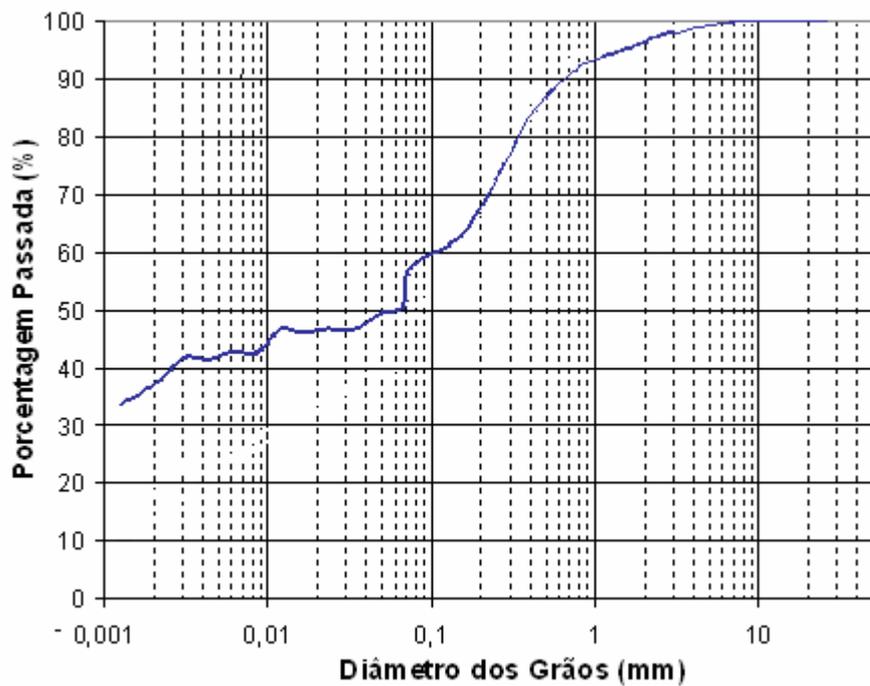
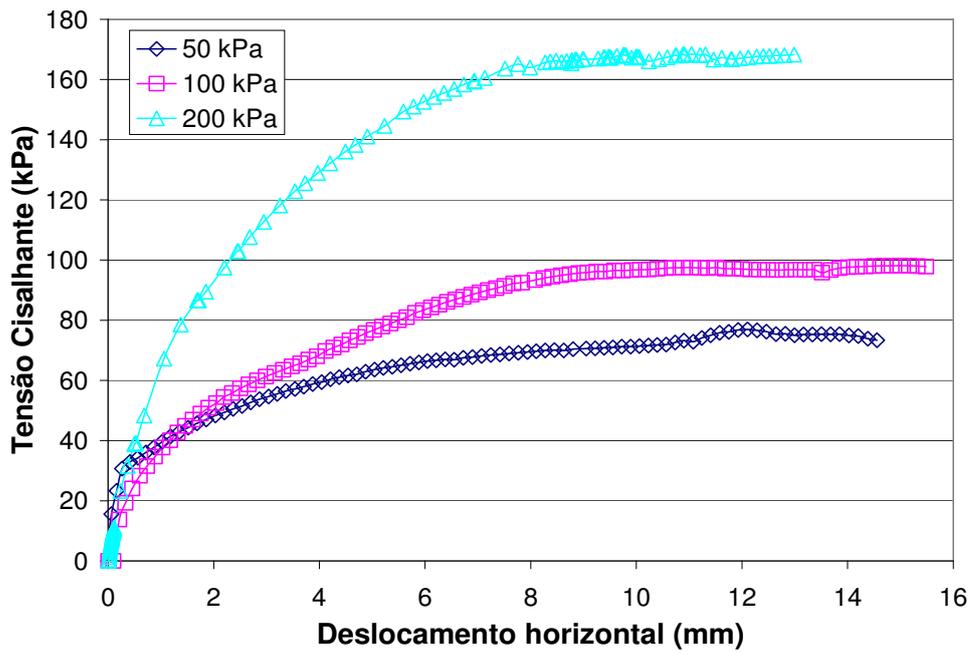
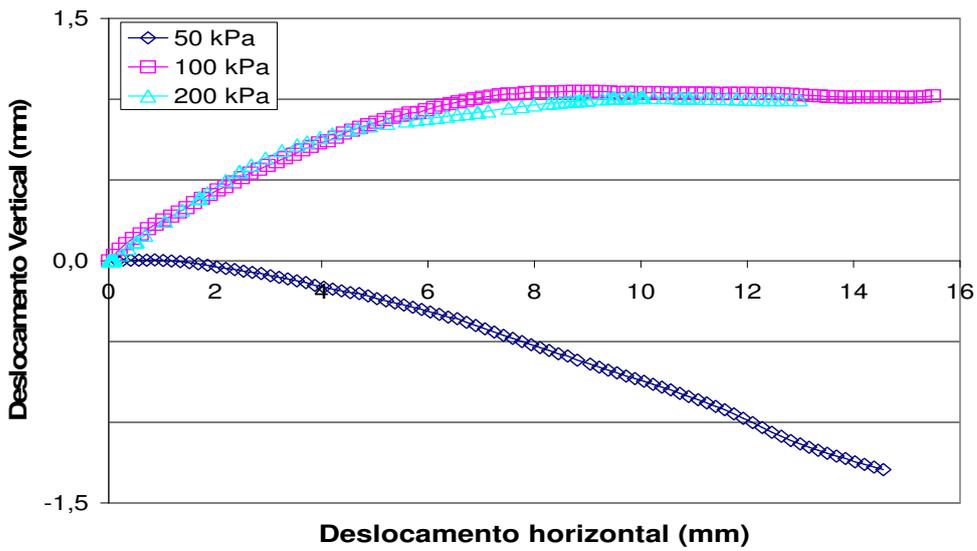


Figura 147 – Curva granulométrica do solo do Museu 2

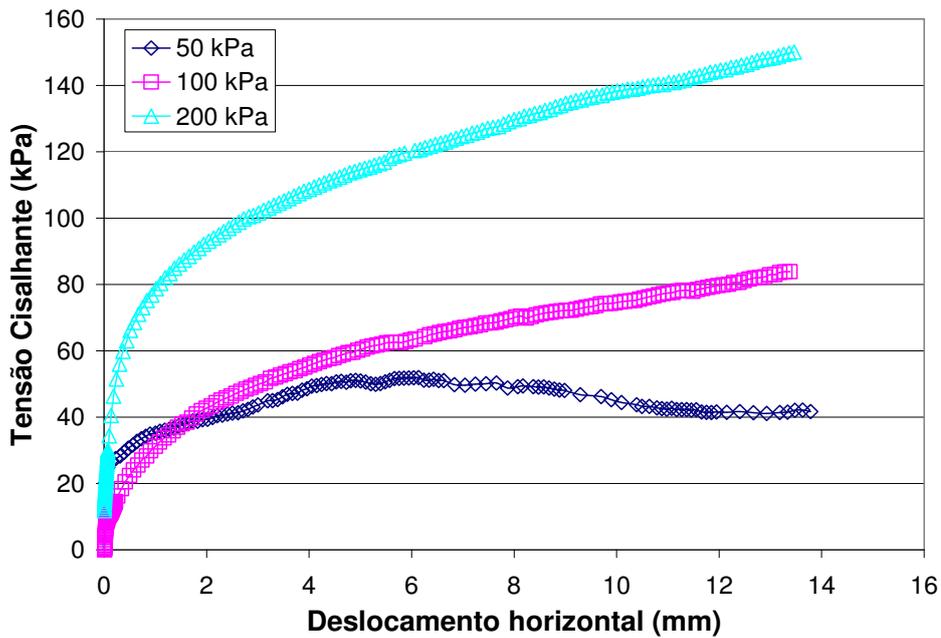


(a) Deslocamento horizontal x Tensão

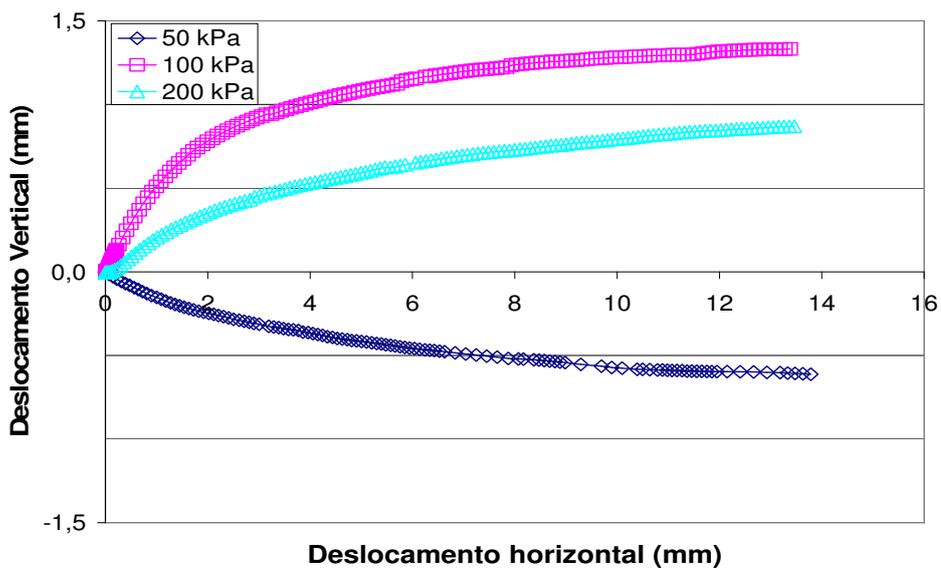


(b) Deslocamento vertical x deslocamento horizontal

Figura 148 – Cisalhamento direto do solo natural do Museu 2 (Proto Silva, 2005)



(a) Deslocamento horizontal x Tensão



(b) Deslocamento horizontal x Deslocamento vertical

Figura 149 – Cisalhamento direto do solo submerso do Museu 2 (Proto Silva, 2005)

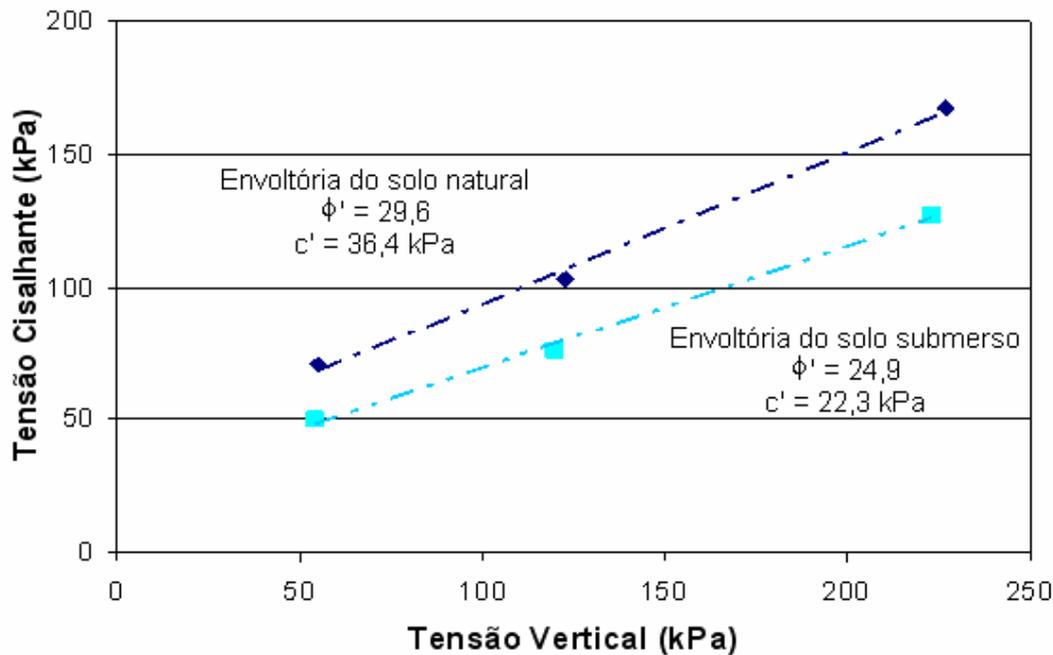


Figura 150 – Envoltórias de resistência do solo do Museu 2 (Proto Silva, 2005)

O Solo 7 apresenta peso específico de $16,6\text{kN/m}^3$, coesão e ângulo de atrito natural iguais a $36,4\text{kPa}$ e $29,6^\circ$, respectivamente. Os resultados são característicos de um solo residual maduro.

8.3. Ensaio de arrancamento

Neste capítulo são apresentados os comportamentos típicos obtidos a partir da campanha de 25 ensaios de arrancamento de grampos realizados.

No Capítulo 6 (Resultados dos ensaios de arrancamento) são apresentadas análises individuais de comportamento e problemas ocorridos em cada ensaio.

A Tabela 51 apresenta as principais características executivas dos ensaios e resultados típicos. Desta tabela, as seguintes informações são fornecidas:

- Nomenclatura → Agrupa duas informações principais: a obra em que foram executados os ensaios (FV [Fagundes Varela], M1 [Museu 1] e M2 [Museu 2]; e a cronologia em que foram executados (de 01 a 25);
- Solo → Identificado por um número de 1 a 7 definidos pela

Tabela 28 e localizados nas áreas definidas pela Figura 45.

- Características executivas → lavagem do furo com água (sim ou não); tempo de cura da nata de cimento (3 ou 10 dias) e número de injeções (1 ou 2);
- F_{\max} → Carga máxima obtida durante o ensaio e utilizada para cálculo da resistência ao arrancamento;
- $\Delta L_{\text{arrancamento}}$ [mm] → é o deslocamento correspondente à máxima força de ensaio;
- $\Delta L_{\text{cisalhamento}}$ [mm] → na hipótese de ocorrer fase de cisalhamento, corresponde ao maior deslocamento de ensaio;
- q_s → Resistência ao arrancamento do grampo.

Tabela 51 – Características dos ensaios de arrancamento dos grampos

Ensaio	Nomenclatura	Solo	Cota	Pré-Lavagem do furo	Nº de injeções	Tempo de cura [dias]	F_{\max} [kN]	$\Delta L_{\text{arrancamento}}$ [mm]	$\Delta L_{\text{cisalhamento}}$ [mm]	q_s [kPa]
1	FV-01	1	-	Não	1	3	96	44	48	101
2	FV-02	2	-	Não	2	3	152	24	45	159
3	FV-03	2	-	Não	2	3	161	22	50	168
4	M1-01	3	50,0	Não	1	3	142	22	35	147
5	M1-02	3	50,0	Não	1	3	139	44	-	145
6	M1-03	3	48,0	Não	2	3	-	-	-	-
7	M1-04	3	48,0	Não	2	10	176	6	-	184
8	M1-05	3	48,0	Não	2	10	193	18	-	201
9	M1-06	3	48,0	Sim	2	10	180	17	27	188
10	M1-07	3	46,0	Sim	2	3	-	-	-	-
11	M1-08	3	46,0	Sim	2	3	208	22	-	217
12	M1-09	3	46,0	Sim	2	3	201	26	-	210
13	M1-10	3	46,0	Não	2	3	192	16	-	200
14	M1-11	4	44,0	Não	1	3	111	76	-	115
15	M1-12	4	44,0	Sim	1	3	129	22	29	134
16	M1-13	4	44,0	Não	1	10	90	135	-	94
17	M1-14	4	44,0	Sim	1	10	124	156	-	129
18	M1-15	5	34,0	Não	2	3	168	32	48	200
19	M1-16	5	34,0	Não	2	3	194	18	-	231
20	M1-17	5	34,0	Não	2	3	176	17	-	211
21	M1-18	5	34,0	Não	1	3	135	28	61	162
22	M1-19	6	31,4	Não	2	3	173	25	-	206
23	M1-20	6	31,4	Não	2	3	168	23	-	200
24	M2-01	7	38,5	Não	1	3	172	12	23	240
25	M2-02	7	38,5	Não	2	3	129	11	21	180

Em estacas, a resistência lateral (aderência) é mobilizada por meio de 3 mecanismos de interação da interface estaca-rocha/solo: adesão (contato), atrito e cisalhamento (embricamento mecânico), conforme apresentado no Capítulo 2 e seguido por diversos autores (Leonhardt e Mönning, 1973; Hanna, 1982, Johnston e outros, 1987; Khan e Amadei, 1993; Lemos, 1994; Benmokrane e outros, 1994; Kodikara e Johnston, 1994; Uijl e Bigaj, 1996; Hassam e O'Neil, 1997). De maneira análoga, nos ensaios de arrancamento de grampos desta pesquisa, procuraram-se fases que poderiam ser classificadas como tendo o mesmo mecanismo de interação apresentado para estacas.

A seguir (Tabela 52 e Tabela 53) são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento da pesquisa em termos de valores mínimo, médio e máximo da força, deslocamento e resistência no instante que define o arrancamento. A Tabela 54 apresenta resultados médios de eficiência de 2 injeções com relação a grampos que receberam apenas 1 injeção.

Tabela 52 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos com 1 injeção

Grampo com 1 injeção (Bainha)			
	F_{max} [kN]	ΔL_(arrancamento) [mm]	q_s [kPa]
Mínimo:	90	22	94
Médio:	121	66	128
Máximo:	141	156	162

Tabela 53 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos com 2 injeções

Grampo com 2 injeções (Re-injetado)			
	F_{max} [kN]	ΔL_(arrancamento) [mm]	q_s [kPa]
Mínimo:	152	6	159
Médio:	181	21	195
Máximo:	208	32	217

Tabela 54 – Resultados médios de eficiência de 2 injeções com relação a grampos que receberam apenas 1 injeção

Influência do número de injeções nos resultados de ensaios de arrancamento de grampos		
$\frac{2 \text{ injeções}}{1 \text{ injeção}}$		
F_{max}	ΔL_(arrancamento)	q_s
1,50	0,31	1,52

Comparando-se os resultados dos ensaios nos grampos com 2 injeções com os de 1 injeção, pode-se concluir que, em média, os grampos re-injetados deslocam-se menos (31% $\Delta L_{(1 \text{ injeção})}$) e apresentam maior resistência ao arrancamento (52% superior a q_s (1 injeção)). A resistência ao arrancamento de grampos com 1 injeção compreende valores entre 94 e 162kN/m², enquanto que grampos com 2 injeções apresentam resultados entre 159 e 217kN/m².

Procurando estabelecer-se um padrão de comportamento Carga x Deslocamento, foram identificadas etapas com diferentes valores de rigidez (Rigidez = $\Delta F / \Delta L$) para cada ensaio de arrancamento. Quatro etapas foram identificadas:

- Etapa 1: **Ajuste do sistema**. Nem sempre esta etapa é identificada. Sua ocorrência é consequência de uma montagem inadequada do sistema de ensaio de arrancamento (com grampo desalinhado, ou com pouco aperto). O valor de rigidez desta etapa não tem aplicação prática;
- Etapa 2: Comum a todos os ensaios e é a etapa de maior rigidez;
- Etapa 3: Comum a todos os ensaios. Apresenta rigidez inferior a da encontrada na etapa 2;
- Etapa 4: **Cisalhamento**. Etapa identificável em alguns ensaios. Corresponde a uma rigidez nula, em que o grampo desloca-se sem que haja incremento de carga, ou um valor próximo a zero.

A Tabela 55 identifica cada uma das etapas por meio dos valores limites de carga (F_n), deslocamento (ΔL_n) e rigidez (R_n).

Assim, a fase 2, representaria a resistência ao arrancamento garantida pela adesão nata-solo; a fase 3 corresponderia à resistência por atrito e/ou embricamento mecânico; e a fase 4 apresentaria resistência por cisalhamento. A Figura 151 apresenta uma curva carga x deslocamento típica (FV-02) das quatro fases identificadas (ajuste do sistema de montagem do ensaio; limite de resistência por adesão; limite de resistência por atrito e/ou embricamento mecânico; e limite de resistência por cisalhamento).

Frank e Zhao (1982) propuseram uma lei de mobilização da resistência ao arrancamento de grampos (Figura 36 e Figura 152a) em que também são descritas três fases. A primeira com rigidez igual a $k\beta$ e inflexão num valor equivalente a metade da resistência ao arrancamento, a segunda com rigidez equivalente a 1/5 de $k\beta$ e inflexão igual ao valor de q_s e a terceira com rigidez nula, ou seja, deslocamento crescente para carregamento constante.

Tabela 55 – Etapas dos ensaios de arrancamento dos grampos

Ensaio	Etapa 1		Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	F ₁	ΔL ₁	F ₂	ΔL ₂	R ₂	F ₃	ΔL ₃	R ₃	F ₄	ΔL ₄	R ₄
	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[MN/m]	[kN]	[mm]	[MN/m]	[kN]	[mm]	[MN/m]
[FV-01]	-	-	47	6	7,4	93	40	1,4	96	44	0,7
[FV-02]	64	1	120	7	9,6	152	24	1,9	152	45	0,0
[FV-03]	70	3	124	9	8,2	161	22	3,2	160	43	0,0
[M1-01]	41	1	85	5	11,2	142	18	4,4	139	35	0,0
[M1-02]	37	7	118	21	5,9	132	32	1,3	139	44	0,5
[M1-04]	-	-	81	2	45,0	177	6	24,8	-	-	-
[M1-05]	-	-	76	3	22,0	188	10	17,0	-	-	-
[M1-06]	61	6	145	12	14,1	180	17	7,0	180	22	0,0
[M1-08]	64	8	171	15	14,8	208	22	5,8	-	-	-
[M1-09]	44	10	181	22	11,0	201	26	6,6	-	-	-
[M1-10]	46	3	107	11	7,2	192	16	18,2	-	-	-
[M1-11]	-	-	77	9	5,7	111	76	0,5	-	-	-
[M1-12]	46	3	124	22	6,1	128	29	0,6	-	-	-
[M1-13]	-	-	39	6	3,7	76	68	0,6	90	135	0,2
[M1-14]	-	-	95	43	1,8	109	80	0,5	124	155	0,2
[M1-15]	36	10	137	19	10,5	162	25	4,6	167	48	0,4
[M1-17]	-	-	177	17	10,0	-	-	-	-	-	-
[M1-18]	-	-	25	2	5,9	122	25	4,3	135	61	0,4
[M1-19]	46	6	137	14	11,3	172	22	4,7	-	-	-
[M1-20]	29	4	154	17	9,1	168	21	4,2	-	-	-

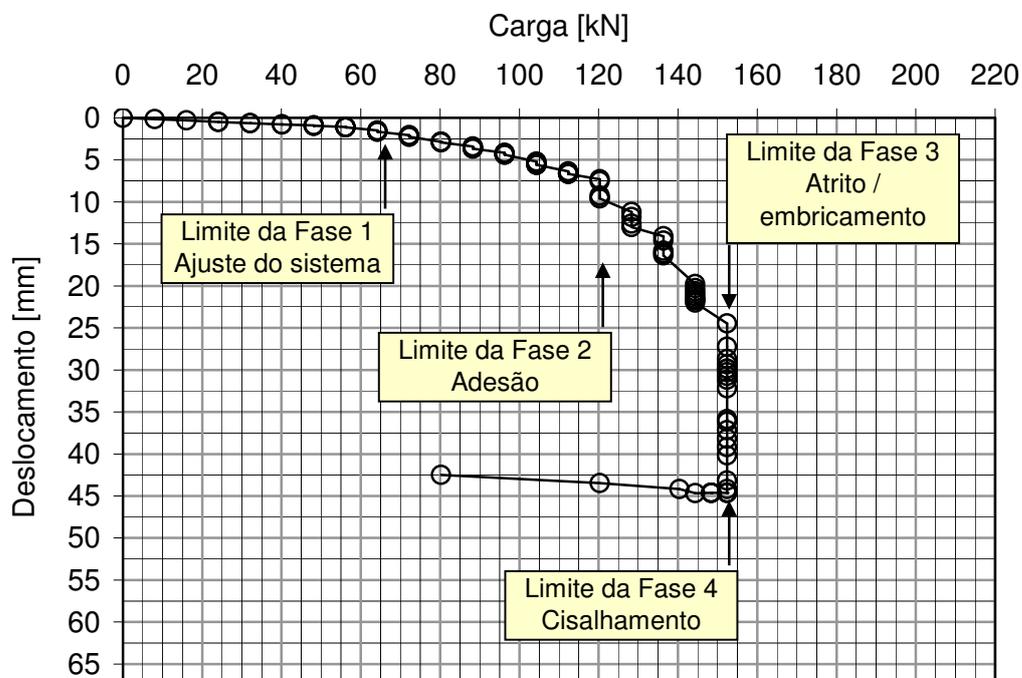
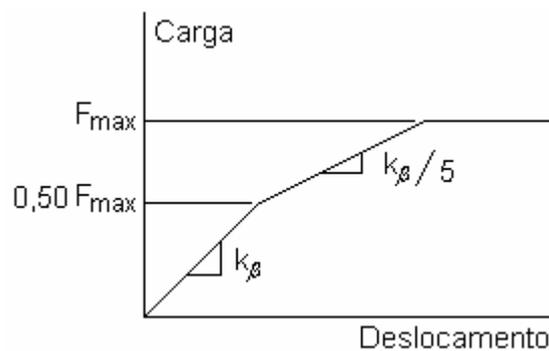
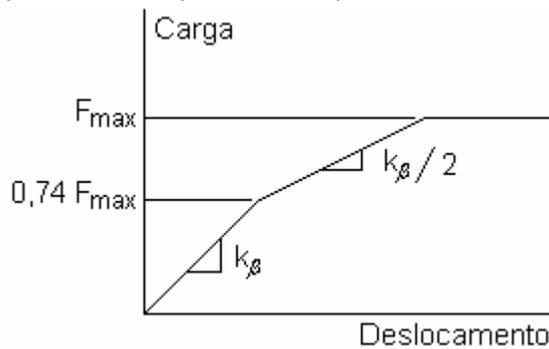


Figura 151 – Fases de mobilização de resistência ao arrancamento em curva Carga x Deslocamento típica

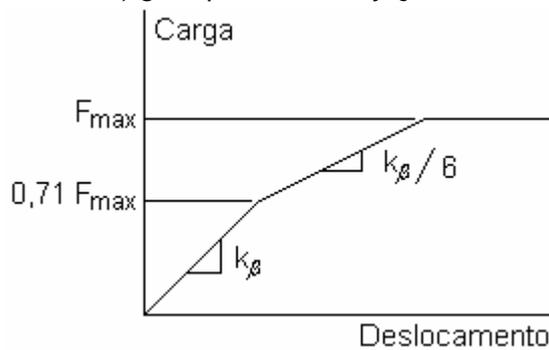
Os comportamentos mecânicos obtidos dos ensaios de arrancamento desta pesquisa são comparados ao proposto por Frank e Zhao (1982) na Figura 152. Considerou-se os comportamentos carga x deslocamento médios obtidos da análise de grampos com 2 injeções (Figura 152b) e 1 injeção (Figura 152c). Observa-se que os limites de carga da primeira para a segunda fase de grampos, com 1 ou 2 injeções, são semelhantes entre si e superiores em cerca de 22,5% do proposto por Frank e Zhao (1982). Quanto à rigidez da segunda fase, grampos com 2 injeções ($k\beta/2$) são mais rígidos do que os grampos com 1 injeção ($k\beta/6$), com rigidez próxima à proposta por Frank e Zhao (1982) e igual a $k\beta/5$.



a) Comportamento apresentado por Frank e Zhao (1982)



b) grampos com 2 injeções



c) grampos com 1 injeção

Figura 152 – Lei de mobilização da resistência ao arrancamento de grampos

A Figura 151 e a Figura 153 são típicas de ensaios com mobilização da resistência no contato grampo-solo. Quando o arrancamento ocorre no contato grampo-solo, a mobilização da resistência ao arrancamento ocorre gradualmente, a partir da cabeça, em direção à parte mais interna do grampo. Ao se aproximar da carga de ruptura do grampo, as curvas tendem a uma distribuição triangular, da cabeça do grampo até a extremidade final.

Ensaio de arrancamento [M1-08]

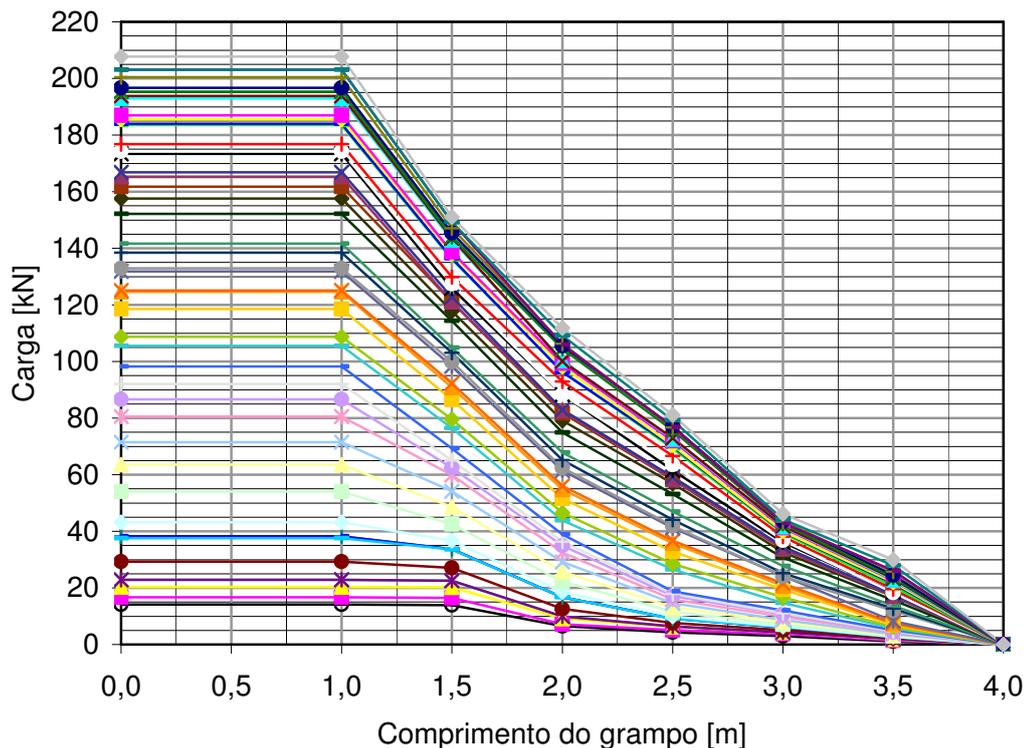


Figura 153 – Distribuição típica de carga ao longo do grampo (contato grampo-solo)

A Figura 154 e a Figura 155 são características de ensaios de arrancamento de grampos mobilizados no contato barra-nata.

Em termos de curvas Carga x Deslocamento, evidencia-se a ausência de inflexão nítida da curva correspondente ao ensaio com mobilização no contato barra-nata (Figura 154), em oposição à do contato nata-solo (Figura 151).

A distribuição de carga ao longo do grampo no ensaio cuja mobilização de resistência ocorre no contato barra-nata (Figura 155), é acentuadamente não uniforme para cargas próximas ao arrancamento, ao contrário da distribuição triangular resultante da mobilização de resistência no contato grampo-solo (Figura 153).

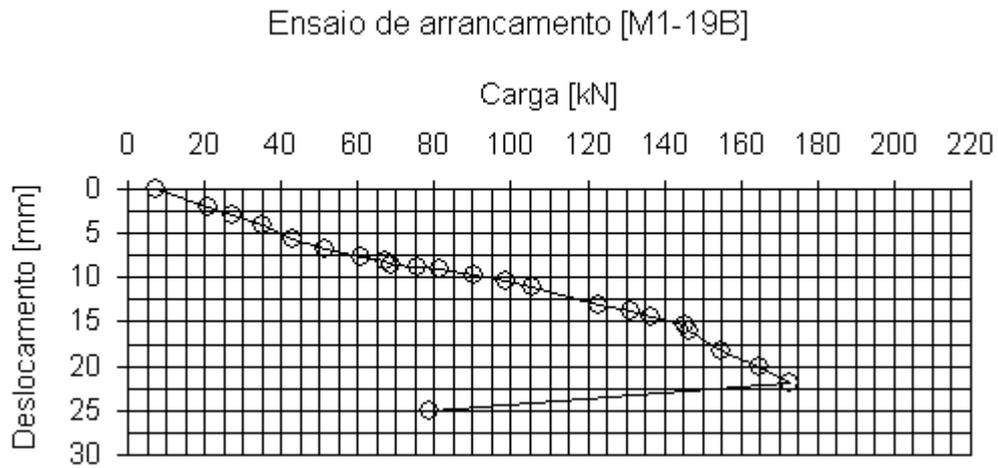


Figura 154 – Curva típica de Carga x Deslocamento de ensaio de arrancamento no contato barra-nata

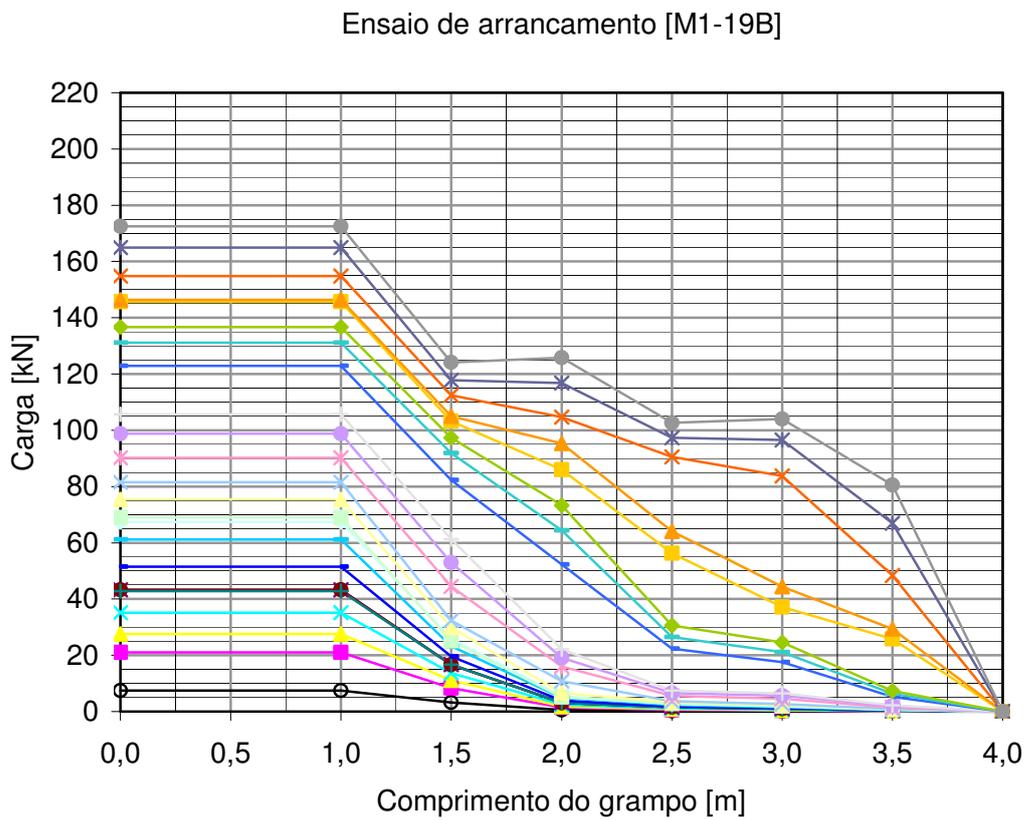


Figura 155 – Distribuição típica de carga ao longo do grampo (contato barra-nata)

8.4. Análise dos fatores de influência

8.4.1. Influência da re-injeção (bainha + 1 injeção)

Nesta pesquisa foram realizados ensaios com 1 injeção (bainha) e com 2 injeções (bainha + 1 injeção). O objetivo foi o de se determinar o efeito de uma re-injeção na resistência ao arrancamento de grampos.

É possível fazer uma análise geral dos valores médios de q_s , utilizando-se dos resultados da Tabela 51. Nesta análise não são considerados os ensaios com resultados atípicos, tais como o grampo M1-16 (problema de montagem do ensaio, em que a luva se prendeu à grade de reação) e os grampos M2-01 e M2-02 (solo com presença de cupinzeiro). A análise considera os valores médios de carga final de ensaio (F_{max}), deslocamento de arrancamento e de resistência ao arrancamento para grampos com 1 injeção (bainha) (Tabela 52), duas injeções (Bainha + 1 injeção) (Tabela 53) e influência da re-injeção (Bainha + 1 injeção) (Tabela 54). A influência da re-injeção é avaliada, dentre outros fatores, em termos de eficiência (E), definida como a relação entre valores com duas injeções e uma única injeção, conforme a seguinte expressão:

$$E_p = \frac{P_{2 \text{ injeções}}}{P_{1 \text{ injeção}}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

E_p = Eficiência da re-injeção no parâmetro P;

$P_{2 \text{ injeções}}$ = Valor do parâmetro com duas injeções; e

$P_{1 \text{ injeção}}$ = Valor do parâmetro com uma única injeção.

Quatro pares de ensaios foram comparados e resumidos na Tabela 56, que apresenta os valores de eficiência da re-injeção na resistência ao arrancamento em função do tipo de solo.

O arrancamento de grampos re-injetados executados no Solo 3 (solo residual maduro - Argila-arenosa marrom avermelhada) forneceram resistência ao arrancamento em média 37% superior à do grampo com 1 injeção (Figura 156).

Tabela 56 – Influência da re-injeção (bainha + 1 injeção) na resistência ao arrancamento

Tempo de cura [dias]	Pré-lavagem do furo	Tipo de solo	Ensaio com 1 injeção		Ensaio com 2 injeções		Eficiência da Re-injeção
			Nº	q _s [Kpa]	Nº	q _s [Kpa]	$\frac{q_{s(2 \text{ injeções})}}{q_{s(1 \text{ injeção})}}$
3	Não	3	M1-01	147	M1-10	200	1,36
3	Não	3	M1-02	145	M1-10	200	1,38
3	Não	5	M1-18	162	M1-15	200	1,23
3	Não	5	M1-18	162	M1-17	211	1,30
Média de eficiência da re-injeção:							1,32

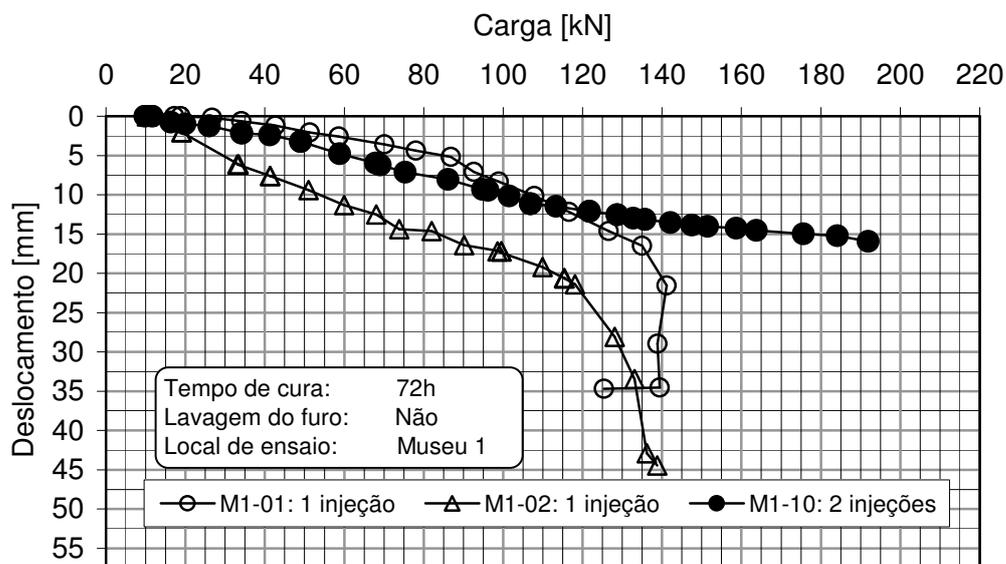


Figura 156 - Influência da re-injeção em ensaios de arrancamento de grampos em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada) – Solo 3

O arrancamento de grampos re-injetados executados no Solo 5 (solo residual jovem - silte areno-argiloso amarelo) forneceu resistência ao arrancamento em média 27% superior à do grampo com 1 injeção (Figura 157). Considerando os resultados obtidos independentemente do grau de naturalidade do solo, a re-injeção provoca um aumento de 32% na resistência ao arrancamento do grampo.

Ressalta-se também que os grampos re-injetados (M1-10, M1-15 e M1-17), além de 32% mais resistentes, são mais rígidos (deslocam-se 27% menos) que os grampos executados somente com 1 injeção (M1-01, M1-02, M1-18).

A maior resistência ao arrancamento obtida em ensaios com 2 injeções deve-se provavelmente ao preenchimento dos vazios causados pela exsudação da calda de cimento da primeira injeção. A exsudação que ocorre após o preenchimento da bainha não permite que o grampo reconstitua o confinamento

existente antes da perfuração. A simples re-injeção pode minimizar os vazios do preenchimento inicial do furo (bainha) e maximizar o contato de todo o comprimento do grampo com o maciço circunvizinho.

A re-injeção se mostrou eficiente e deve ser sempre adotada.

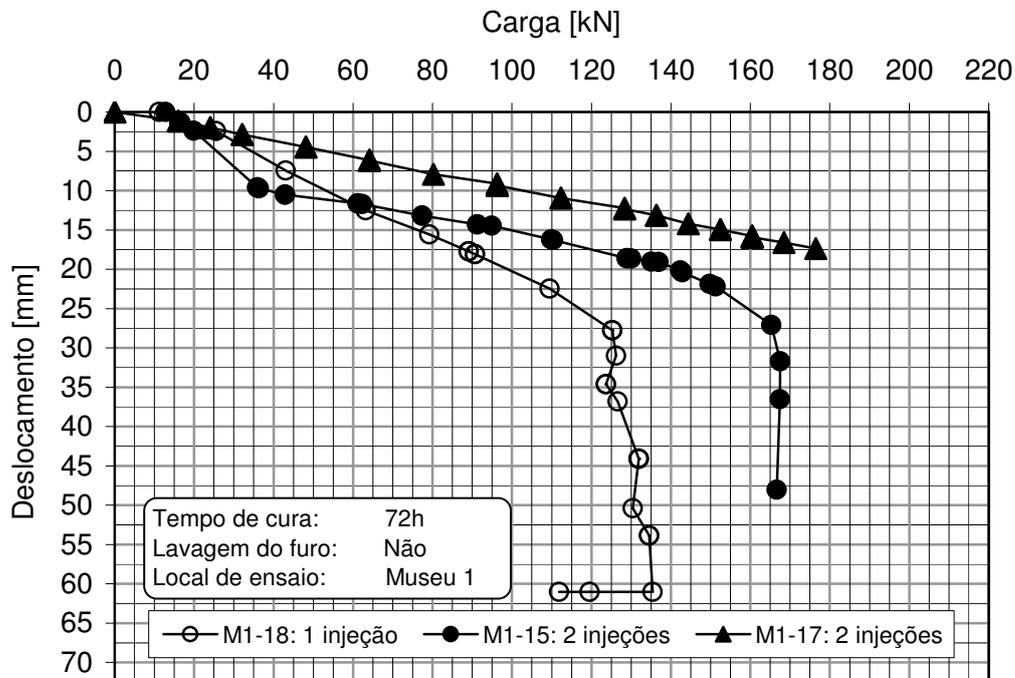


Figura 157 - Influência da re-injeção em ensaios de arrancamento de grampos em solo residual jovem (silte areno-argiloso amarelo) – Solo 5

8.4.2. Influência do tipo de re-injeção (bainha + 1 injeção)

Foram estudados os efeitos de re-injeção considerando-se dois tipos: re-injeção a partir do início do grampo e re-injeção com mangueira de polietileno e válvulas manchetes a cada 0,5m ao longo do grampo. Os resultados dos ensaios de arrancamento executados no Solo 2 (residual jovem; ensaios FV-03 e FV-02); no Solo 3 (residual maduro; ensaios M1-08 e M1-09) e no Solo 6 (rocha alterada; ensaios M1-19 e M1-20) são apresentados nas figuras Figura 158, Figura 159 e Figura 160, respectivamente. A Tabela 57 resume os valores de resistência ao arrancamento e de eficiência do tipo de re-injeção.

Os resultados indicam que não há uma diferença significativa entre os dois modos de re-injeção, uma vez que o aumento médio da resistência ao arrancamento é de apenas 4% a favor da injeção pela boca.

Deve-se repensar o modo como a re-injeção vem sendo executada. A pressão de re-injeção medida variou de 0,4 a 2,0MPa. Pergunta-se se ela foi suficiente para romper a válvula manchete no interior da nata e romper a nata endurecida. Questiona-se também se a mangueira de polietileno não teria rompido no trecho livre o que equivaleria a uma re-injeção pela boca do furo. Das exumações realizadas (FV-02, FV-03, M1-19 e M1-20) verificou-se que não há uma penetração da nata no solo pela pressão de injeção. Constatou-se somente a formação de uma camada fina sobre a nata de primeira injeção e o preenchimentos de vazios (Capítulo 7).

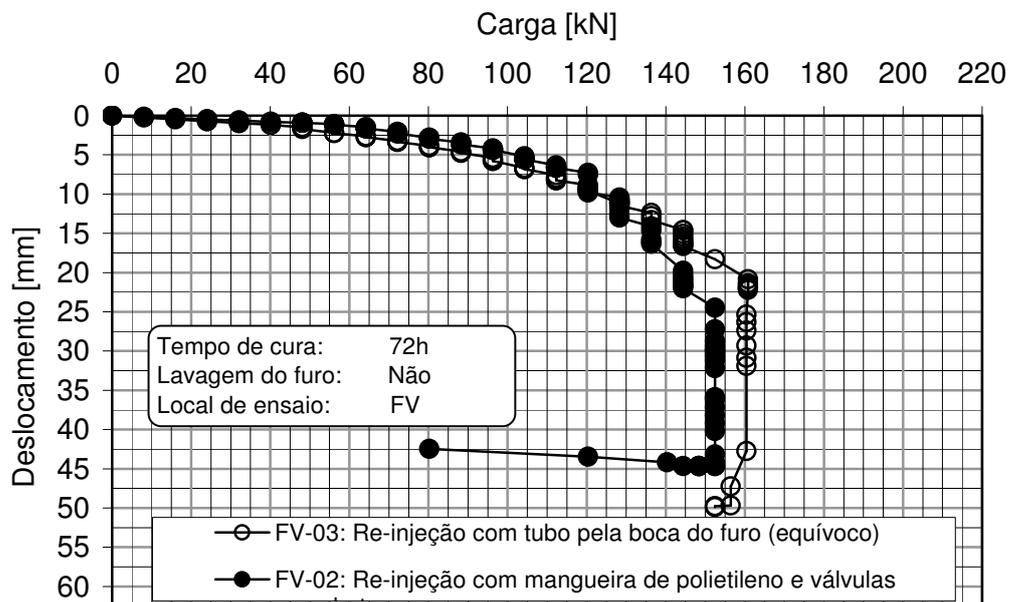


Figura 158 – Influência do tipo de re-injeção em ensaios de arrancamento de grampões em solo residual jovem – Solo 2

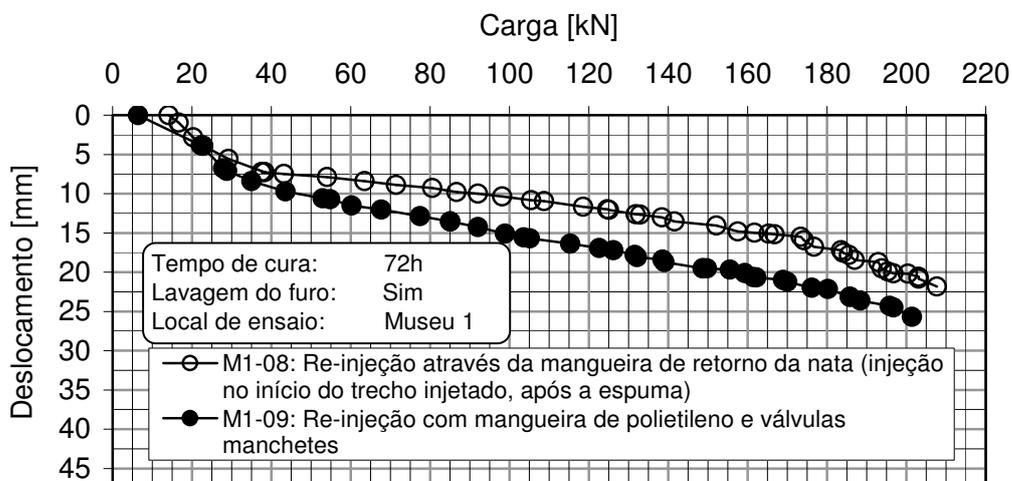


Figura 159 - Influência do tipo de re-injeção em ensaios de arrancamento de grampões em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada) – Solo 3

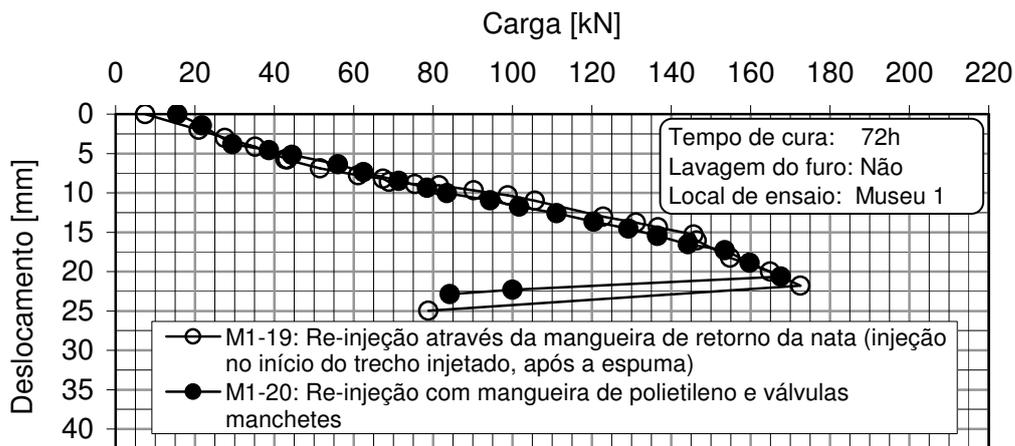


Figura 160 - Influência do tipo de re-injeção em ensaios de arrancamento de grampos em rocha alterada (argila-arenosa marrom avermelhada) – Solo 6

Tabela 57 – Influência do tipo de re-injeção (Bainha + 1 injeção)

Tempo de cura [dias]	Pré-lavagem do furo	Tipo de solo	Grampo com re-injeção pela boca		Grampo com re-injeção pelo comprimento		Eficiência
			Nº	q_s [Kpa]	Nº	q_s [Kpa]	
3	Não	2	FV-03	168	FV-02	159	$\frac{q_{s(\text{re-injeção na boca})}}{q_{s(\text{re-injeção no comprimento})}}$ 1,06
3	Sim	3	M1-08	217	M1-09	210	1,03
3	Não	6	M1-19	206	M1-20	200	1,03
Média da eficiência:							1,04

8.4.3. Influência da pré-lavagem do furo

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 procedimento é recomendado para solos com baixo teor de umidade. Em terrenos úmidos, a própria perfuratriz deve utilizar água para perfuração e limpeza do furo.

Visando-se estudar a influência da lavagem do furo com água, na resistência ao arrancamento de grampos, foram executados 3 pares de ensaios cujos resultados são apresentados na Tabela 58. A Figura 161, a Figura 162 e a Figura 163 apresentam as curvas Carga x Deslocamento, considerando os ensaios executados no Solo 3 e Solo 4 (residual maduro), com 1 (bainha) ou 2 injeções (bainha + 1 injeção).

Para grampos re-injetados (M1-09 e M1-10) a lavagem do furo forneceu (Figura 161) resistência ao arrancamento 5% maior que a obtida em furos secos (não lavados). Talvez a influência da re-injeção seja preponderante sobre o resultado.

Já em grampos com apenas 1 injeção (bainha), correspondentes aos ensaios M1-11 e M1-12 (Figura 162) e M1-13 e M1-14 (Figura 163), a lavagem do furo apresentou uma resistência ao arrancamento em média 27% maior. Os grampos lavados também apresentaram maior rigidez.

A lavagem do furo com água acarreta um aumento significativo dos custos da obra em solo grampeado, além de ser mais um insumo a ser comprado e previsto, no caso de obras em que se faça uso de caminhão pipa. O procedimento de limpeza do furo com água promove um acréscimo no valor de q_s de apenas 20% e este valor não justifica a sua execução rotineira.

Um problema observado durante o procedimento de lavagem foi o fato do solo ficar úmido e enlameado na região de trabalho, prejudicando a movimentação de equipamentos e pessoas.

A lavagem do furo com água se justifica em terrenos úmidos, em que a própria perfuratriz deve, por princípio, utilizar água para perfuração e limpeza do furo.

Tabela 58 – Influência da lavagem do furo na resistência ao arrancamento

Tempo de cura [dias]	Nº de injeções	Tipo de solo	Grampos em furos não lavados		Grampo em furos pré-lavados		Eficiência da lavagem
			Nº	q_s [Kpa]	Nº	q_s [Kpa]	
3	2	3	M1-10	200	M1-09	210	1,05
3	1	4	M1-11	115	M1-12	134	1,17
10	1	4	M1-13	94	M1-14	129	1,37
Média da eficiência da lavagem do furo com água							1,20

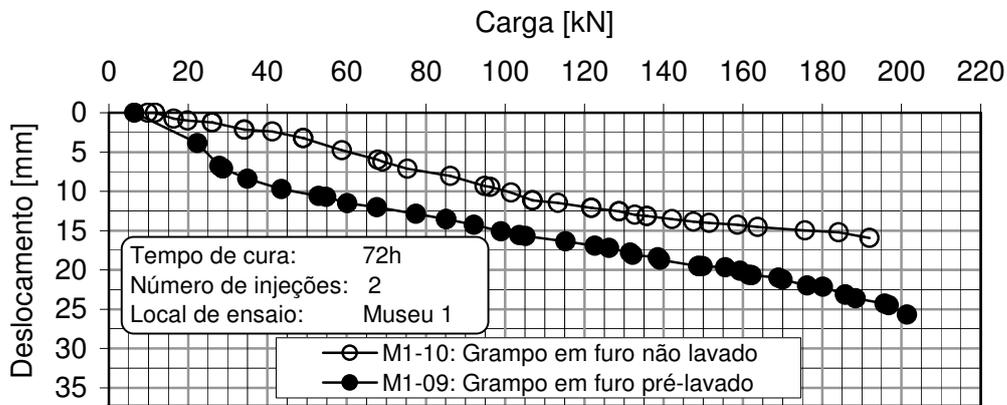


Figura 161 - Influência da lavagem do furo em ensaios de arrancamento de grampos re-injetados em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada) – Solo 3

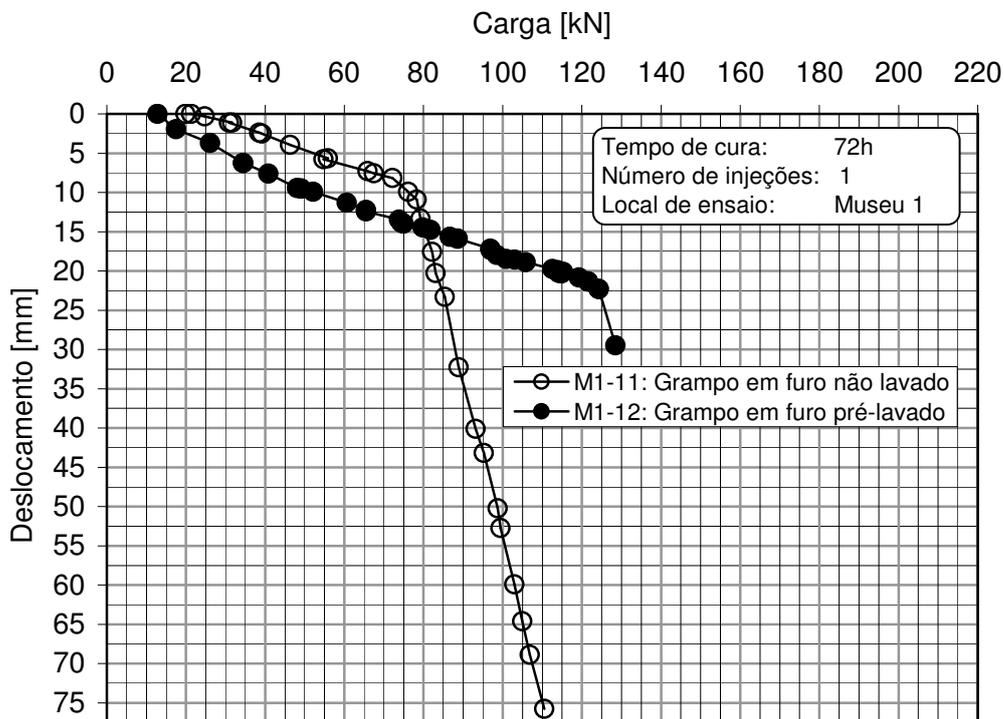


Figura 162 - Influência da lavagem do furo em ensaios de arrancamento de grampos com bainha em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada e silte-argiloso branco) - Solo 4

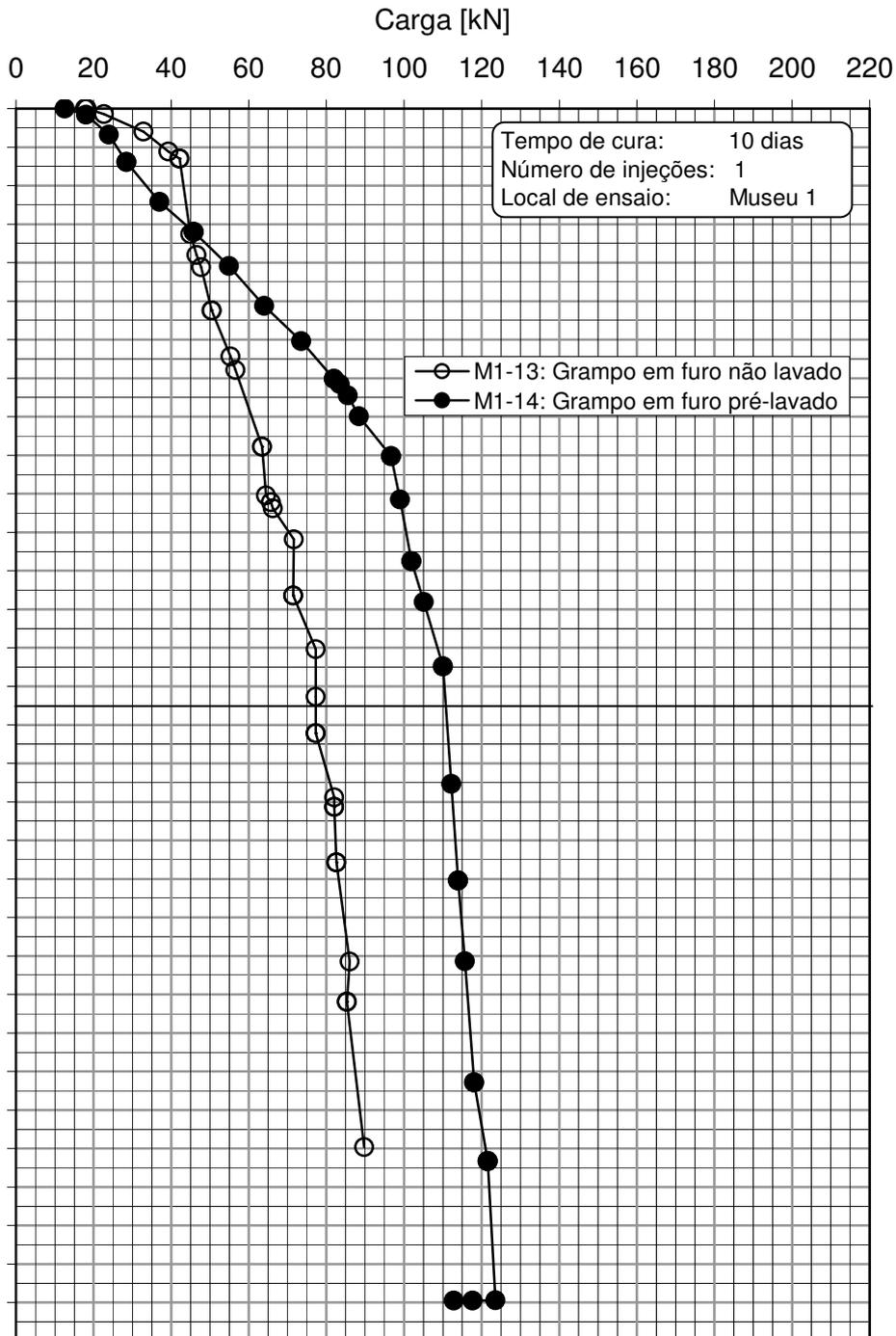


Figura 163 - Influência da lavagem do furo em ensaios de arrancamento de grampos com bainha em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada e silto-argiloso branco) - Solo 4

8.4.4. Influência do tempo de cura da nata de cimento

Um dos principais objetivos da pesquisa consiste na determinação dos valores de q_s obtidos em solos residuais em um intervalo relativamente curto

entre a instalação do grampo e a execução do ensaio de arrancamento, correspondendo, portanto, ao tempo de cura da nata de cimento. Este estudo fornece subsídios para a avaliação da velocidade com que as escavações em solo grampeado podem ser realizadas.

Foram realizados 4 pares de ensaios, testando-se tempos de cura de 3 e 10 dias. Os resultados obtidos são resumidos na Tabela 59 e apresentados em função do tipo de solo na Figura 164 e na Figura 165. Observa-se que em nenhum dos 4 ensaios, houve aumento de resistência ao arrancamento para tempo de cura de 10 dias.

Tabela 59 – Influência do tempo de cura da nata na resistência ao arrancamento

Nº de injeções	Pré-lavagem do furo	Tipo de solo	Grampo com cura em 3 dias		Grampo com cura em 10 dias		Eficiência $\frac{q_{s(\text{cura 10 dias})}}{q_{s(\text{cura 3 dias})}}$
			Nº	q_s [Kpa]	Nº	q_s [Kpa]	
2	Não	3	M1-10	200	M1-05	201	1,01
2	Sim	3	M1-09	210	M1-06	188	0,90
1	Não	4	M1-11	115	M1-13	94	0,82
1	Sim	4	M1-12	134	M1-14	129	0,96
Média da eficiência do tempo de cura:							0,92

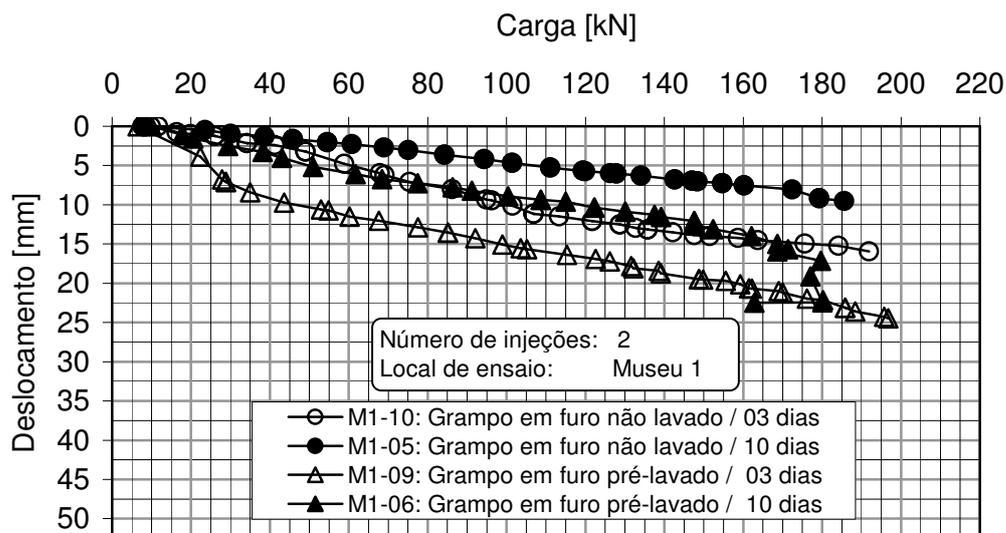


Figura 164 - Influência do tempo de cura da nata de cimento em ensaios de arrancamento de grampos em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada) – Solo 3

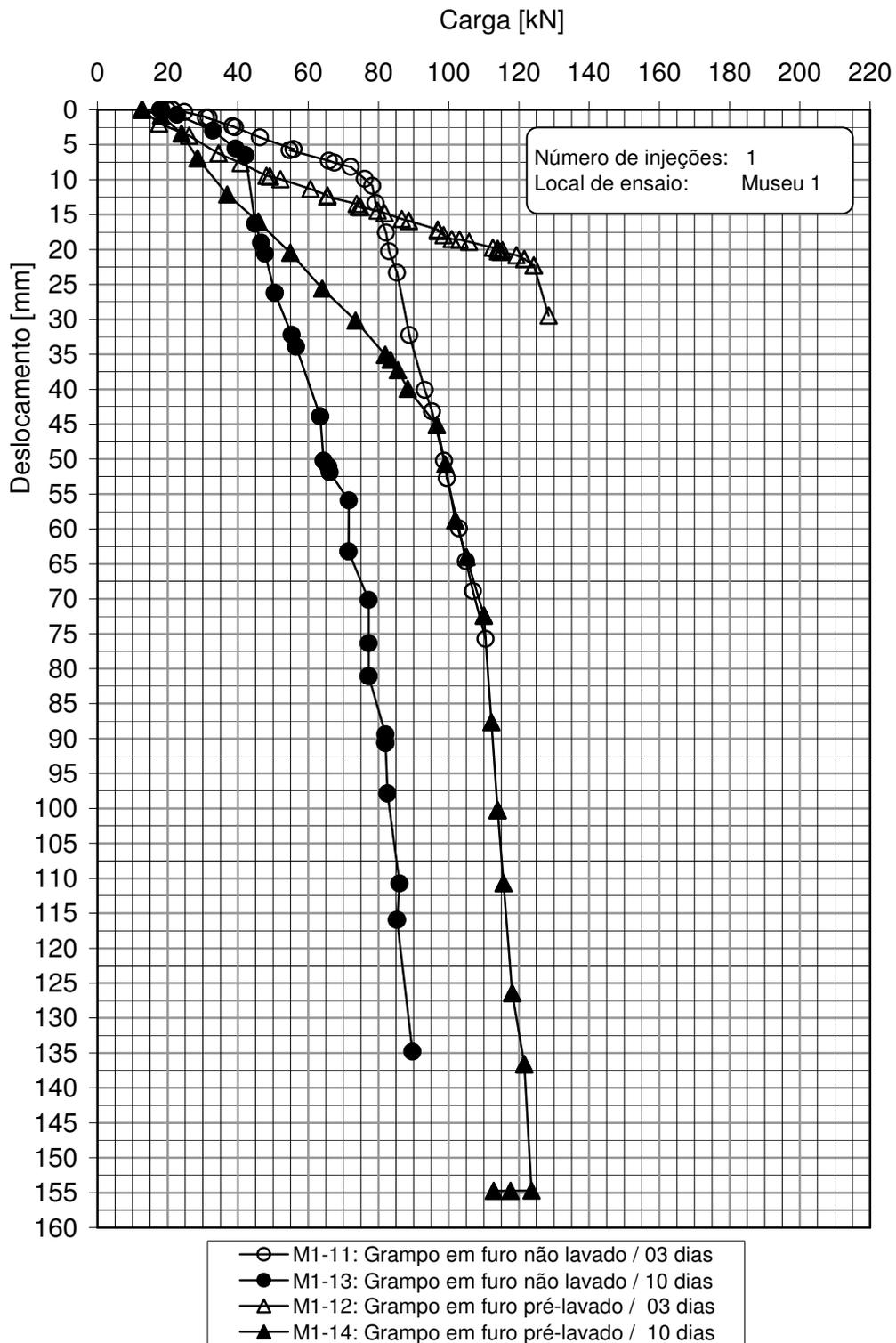


Figura 165 - Influência do tempo de cura da nata de cimento em ensaios de arrancamento de grampas em solo residual maduro (Argila-arenosa marrom avermelhada e silto-argiloso branco) - Solo 4

Como os grampos apresentaram valores de q_s satisfatórios com períodos de cura mínimos (3 dias), o tempo de execução da obra pode ser diminuído, gerando, portanto, uma redução de custos. Empresas de engenharia estimam que na composição de custos de uma obra geotécnica, cerca de 40% dos gastos são destinados à mão-de-obra, 40% ao material e 20% para a disponibilização de equipamentos.

8.5. Correlações empíricas

A resistência ao arrancamento (q_s) deve ser obtida em ensaios de arrancamento durante a obra. Porém, na fase de pré-dimensionamento e na ausência de experiência específica, pode-se estimar a resistência ao arrancamento (q_s) por meio de correlações empíricas da literatura. Este item procura avaliar as correlações empíricas propostas por Ortigão e Palmeira (1997) e de Proto Silva (2005).

Da área do Museu 1, onde foram executados os ensaios de arrancamento da presente pesquisa, há duas sondagens SPT (SP01 e SP03) que são representativas para todos os ensaios de arrancamento do Museu 1. A Tabela 60 apresenta os valores de $N(SPT)$ correspondentes a cada ensaio de arrancamento. Também compara os valores de q_s obtidos de ensaios com valores estimados pela correlação de Ortigão e Palmeira (1997), expressa por:

$$q_s = 60 \ln[N(SPT)] + 67 \quad \text{Equação 19}$$

Os resultados de q_s estimados pela Equação 19 são em média 88% maiores que os obtidos por meio dos ensaios de arrancamento.

A Figura 166, apresenta os resultados de q_s em função de função de $N(SPT)$ obtidos por Ortigão e Palmeira (1997) e os da presente pesquisa. Observa-se a dispersão acentuada para valores reduzidos de $N(SPT)$, provavelmente devida à variabilidade de tipos de solos selecionados pelos dois autores.

Caso, apenas os resultados da presente pesquisa sejam levados em consideração (Figura 167), obtém-se uma correlação de menos dispersão e mais específica para solo residual de gnaiss, expressa por:

$$q_s = 45,12 \ln[N(SPT)] - 14,99 \quad \text{Equação 20}$$

Tabela 60 – Valores de N(SPT) referentes aos ensaios de arrancamento no Museu 1

Ensaio	Solo	Cota	Sondagem	N(SPT)		q _s		
				Golpes cm	Golpes 30cm	ensaio [kPa]	estimado	$\frac{\text{Estimado}}{\text{Ensaio}}$
[N°]	[N°]	[m]	[N°]			[kPa]	265	1,80
M1-01	3	50,0	SP03	27/30	27	147	265	1,83
M1-02	3	50,0		27/30	27	145	334	1,82
M1-04	3	48,0		20/7	86	184	334	1,66
M1-05	3	48,0		20/7	86	201	334	1,78
M1-06	3	48,0		20/7	86	188	385	1,77
M1-08	3	46,0		20/3	200	217	385	1,83
M1-09	3	46,0		20/3	200	210	385	1,92
M1-10	3	46,0		20/3	200	200	271	2,36
M1-11	4	44,0		30/30	30	115	271	2,02
M1-12	4	44,0		30/30	30	134	271	2,88
M1-13	4	44,0		30/30	30	94	271	2,10
M1-14	4	44,0	30/30	30	129	324	1,62	
M1-15	5	34,0	SP01	48/20	72	200	324	1,40
M1-16	5	34,0		48/20	72	231	324	1,53
M1-17	5	34,0		48/20	72	211	324	2,00
M1-18	5	34,0		48/20	72	162	361	1,75
M1-19	6	31,5		45/10	135	206	361	1,81
M1-20	6	31,5		45/10	135	200	265	1,80
Média dos resultados estimados pela Equação 19 sobre os valores de ensaios de arrancamentos reais:								1,88

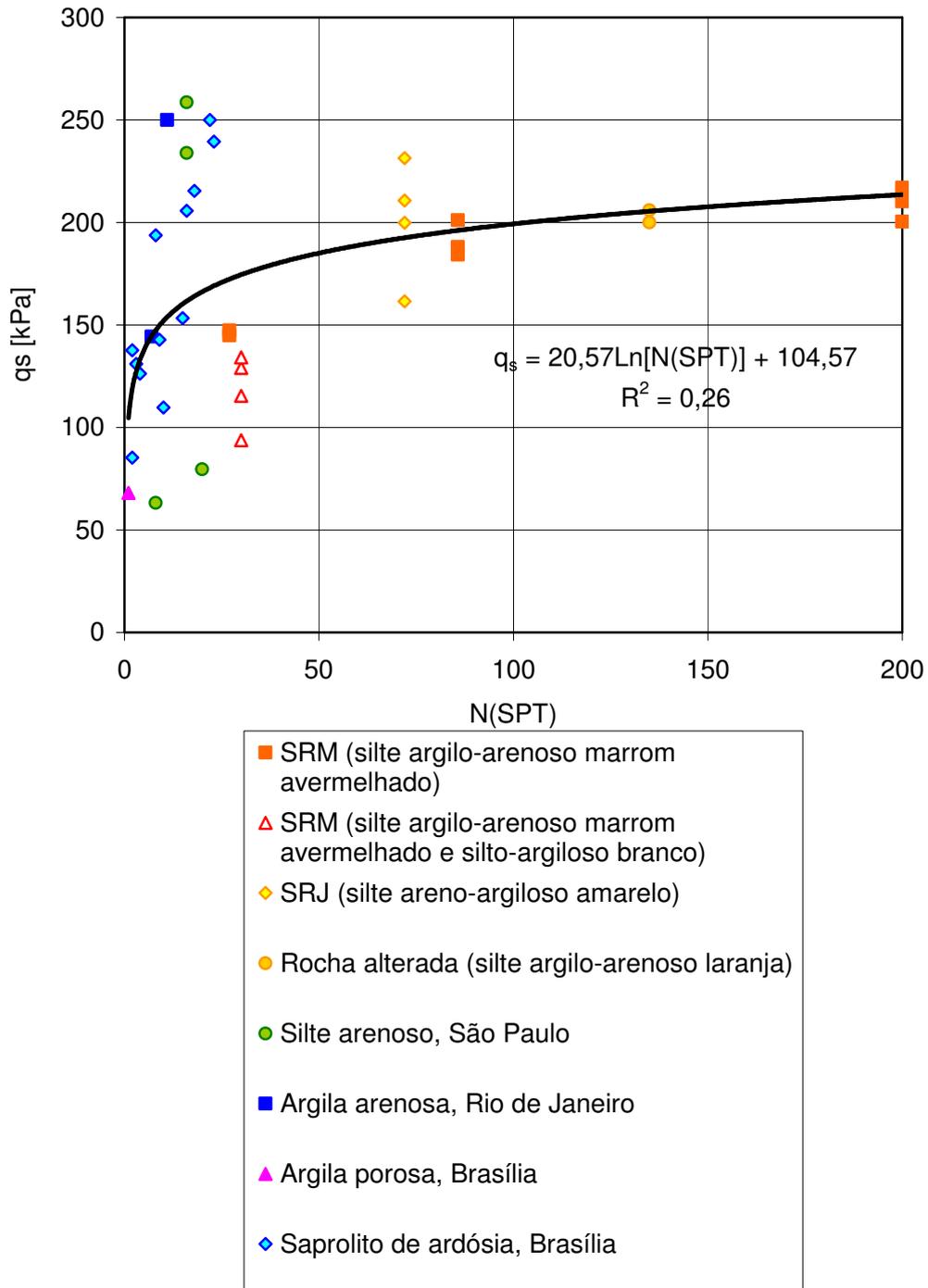


Figura 166 – Correlação entre q_s e número de golpes N(SPT)

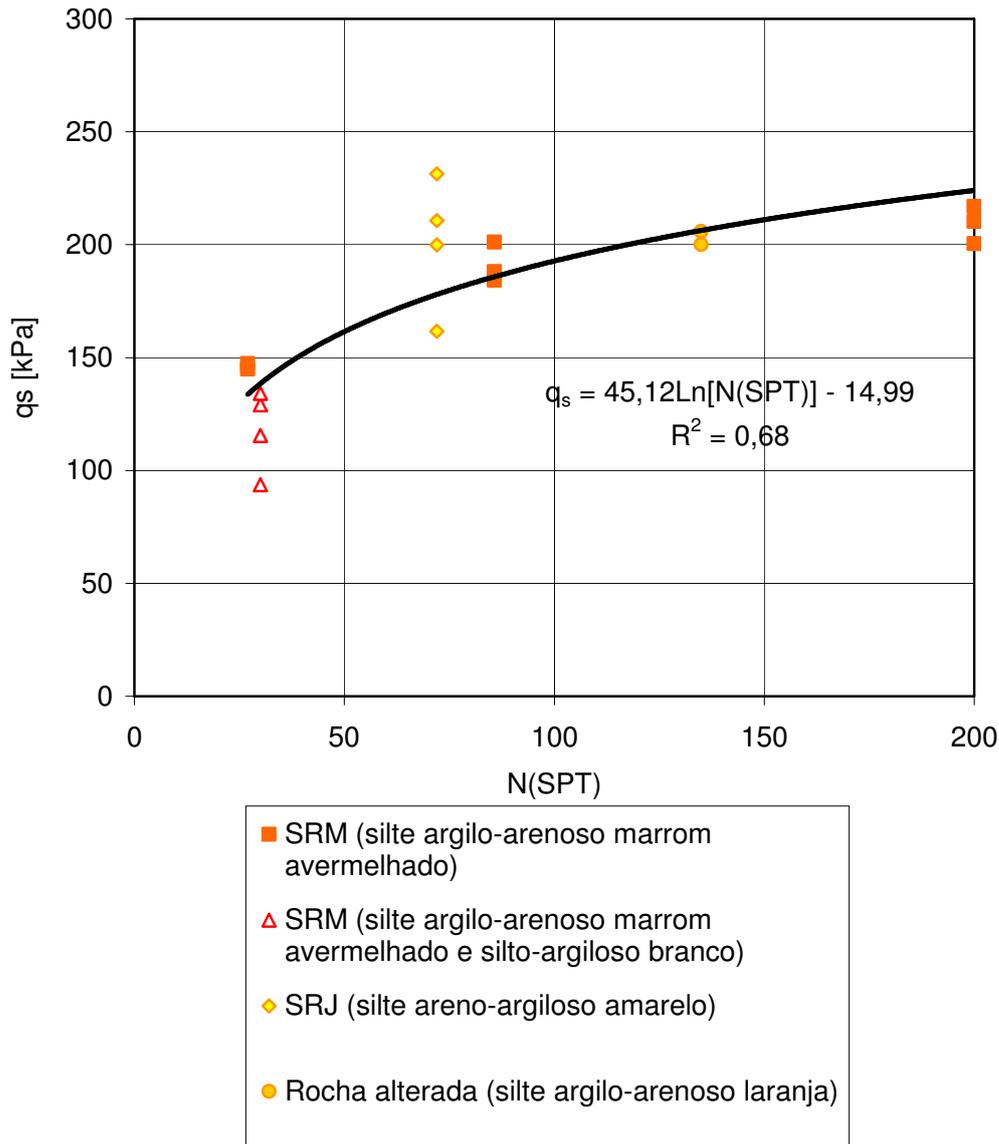


Figura 167 – Correlação entre q_s e número de golpes $N(\text{SPT})$ para solo residual de gnaise

Proto Silva (2005) apresenta uma relação semi-empírica para se avaliar a resistência ao arrancamento de grampos (Equação 02), baseada nos parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento, obtidos em ensaios de cisalhamento direto no laboratório, apresentados no Capítulo 2. Para isto foram realizados ensaios de arrancamento em uma obra de solo grampeado executada em um maciço de solo residual de gnaise e ensaios de cisalhamento direto no solo e na interface solo/nata de cimento para avaliação das propriedades mecânicas destes materiais.

A Tabela 61 apresenta algumas comparações entre os resultados experimentais de resistência ao arrancamento da presente pesquisa e os

resultados obtidos por meio da relação proposta por Proto Silva (2005). Apenas os grampos de arrancamento re-injetados foram considerados, uma vez que os grampos de Proto Silva (2005) apresentam 2 injeções (bainha + 1 injeção). Além disto, somente os solos do Museu 1 foram utilizados nas análises.

Na Tabela 61 são apresentados os valores dos parâmetros que foram aplicados à Equação 02. Além disso, a análise foi subdividida em solos residuais jovens (SRJ) e maduros (SRM) da obra do Museu 1.

Da análise comparativa entre os valores de q_s estimados pela Equação 02 e os obtidos a partir de ensaios de arrancamento, conclui-se:

- (i) A relação proposta por Proto Silva (2005) é a favor da segurança, uma vez que os valores calculados de q_s são sempre menores que os obtidos por meio dos ensaios de arrancamento (apresentam valores entre 70 e 92% dos valores de q_s de ensaios de arrancamento);
- (ii) A relação aplica-se melhor em solos residuais jovens, uma vez que a diferença média entre valores de q_s medidos e calculados é de apenas 8%;
- (iii) Em solos residuais maduros, os valores médios de q_s estimados por meio da relação de Proto Silva (2005), são 30% menores que os valores obtidos dos ensaios de arrancamento.

Tabela 61 – Comparações entre os resultados experimentais e os obtidos pela relação de Proto Silva (2005)

Grampo	M1-15	M1-16	M1-17	M1-04	M1-05	M1-06	M1-08	M1-09	M1-10	
Solo Residual	Jovem (SRJ)			Maduro (SRM)						
Local	Obra Museu 1									
Lavagem do Furo	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	
n° de injeções	2									
Tempo de cura [dias]	3			10			3			
$\sigma_{n(média)}$ [kN/m ²]	87			61			65			
λ_1^*	-			2,01			1,99			
λ_1	1,99			-			-			
α	0,798			1,177			1,181			
c' [kN/m ²]	59			19						
ϕ' [graus]	36,4			32,8						
$q_{s(1)}$ [kN/m ²]	200	231	211	184	201	188	217	210	200	
$q_{s(2)} = \lambda_1^* \alpha (c' + \sigma_n \text{tg} \phi')$ [kN/m]	196			138			143			
$\frac{q_{s(2)}}{q_{s(1)}}$	Resultados individuais:	0,98	0,85	0,93	0,75	0,69	0,73	0,66	0,68	0,72
	Valores médios:	para SRJ			para SRM					
		0,92			0,70					
	Média de todos os resultados:	para SRJ e SRM								
0,78										
<p>Onde:</p> <p>λ_1^* Fator de carga para solo residual maduro (argila-arenosa)</p> <p>λ_1 Fator de carga para solo residual jovem (areia argilosa)</p> <p>α Coeficiente de interface</p> <p>c' Coesão do solo</p> <p>ϕ' Ângulo de atrito do solo</p> <p>$\sigma_{n(média)}$ Tensão normal aplicada ao grampo média</p> <p>$q_{s(1)}$ Resistência ao arrancamento obtida por ensaios de arrancamento</p> <p>$q_{s(2)}$ Resistência ao arrancamento calculada pela relação de Proto Silva (2005)</p>										