

## 4. Programa experimental de laboratório

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental de laboratório da presente pesquisa. Os ensaios realizados objetivaram a determinação de parâmetros de resistência que auxiliassem a análise da resistência lateral dos grampos na encosta de solo residual de gnaíse, o programa de experimentos envolveu os seguintes ensaios:

- ensaios de caracterização;
- ensaios de cisalhamento direto convencionais;
- ensaios de cisalhamento direto na interface solo-nata de cimento

Para a realização deste programa experimental foram utilizados 8 blocos cúbicos de amostras indeformadas, com 30 cm de aresta, de solo residual coletados ao longo do perfil do talude. Os blocos foram retirados aos pares para garantir quantidade suficiente de material para realização da campanha completa de ensaios. Os pares de blocos foram retirados nas mesmas cotas de realização dos ensaios de arrancamento (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), nas áreas vizinhas aos furos de instalação dos grampos (Figura 1). Estes cuidados foram tomados a fim de se garantir a maior representatividade do material coletado em relação ao da superfície lateral do grampo

Os blocos foram extraídos, embalados e transportados pela equipe técnica do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, onde todos os cuidados foram tomados para a preservação das características estruturais e do teor de umidade do material.

Os blocos foram identificados, portanto, considerando a cota de escavação e seqüência de extração (Figura 1), da seguinte forma:

- B01 – blocos retirados na cota 35,0m;
- B02 – blocos retirados na cota 27,0m;
- B03 – blocos retirados na cota 21,0m;
- B04 – blocos retirados na cota 17,5m.

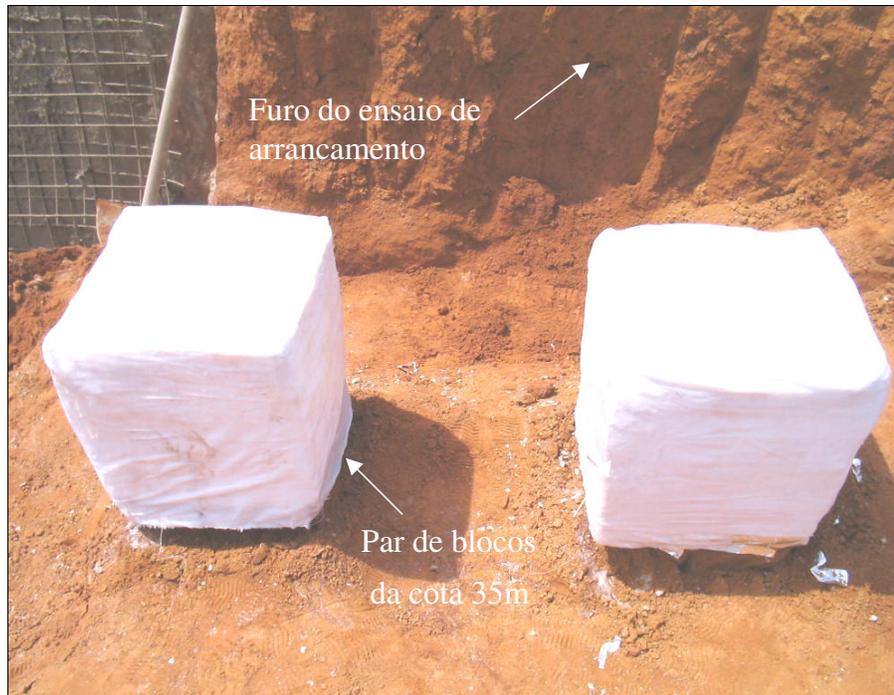


Figura 1 – Coleta das amostras indeformadas à frente dos furos de ensaios de arrancamento.

#### **4.1. Ensaio de caracterização**

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

As amostras foram previamente secas ao ar, destorroadas e homogeneizadas. Para a realização dos ensaios de caracterização, utilizou-se uma estufa com temperatura controlada em 105°C e uma balança com precisão de 0,01g. Nos ensaios de sedimentação utilizou-se como defloculante uma solução com hexametáfosfato de sódio. A classificação do solo em função da análise granulométrica baseou-se nas definições preconizadas pela ABNT.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios de caracterização. Nesta tabela, os valores do teor de umidade correspondem à média dos valores obtidos nas amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto do solo.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de caracterização.

	<b>B01</b>	<b>B02</b>	<b>B03</b>	<b>B04</b>
<b>Caracterização</b>	Argila arenosa	Areia argilosa	Areia argilosa	Areia argilosa
<b>LL (%)</b>	33,2	38,1	35,9	34,6
<b>LP (%)</b>	17,5	24,7	23,7	22,9
<b>IP (%)</b>	15,8	13,4	12,5	11,7
<b>w (%)</b>	15,0	15,8	17,1	17,3
<b>G</b>	2,69	2,73	2,71	2,74
<b>C<sub>u</sub></b>	294,5	205,2	120,5	114,1
<b>C<sub>c</sub></b>	-	0,9	0,9	0,9

onde: LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; w = teor umidade natural; G = densidade relativa dos grãos; C<sub>u</sub> = coeficiente de não uniformidade; C<sub>c</sub> = coeficiente de curvatura.

A distribuição granulométrica também foi determinada e a Figura 2 apresenta as curvas granulométricas obtidas para as 4 profundidades de coleta dos blocos.

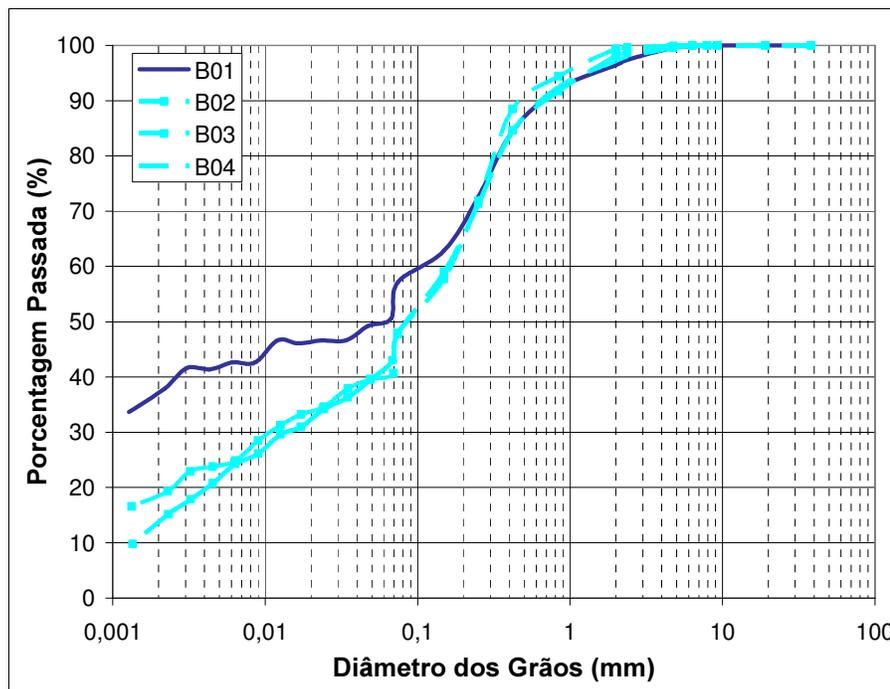


Figura 2 - Curvas granulométricas dos solos B01, B02, B03 e B04.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo da amostra B01 é classificado com sendo um solo de baixa plasticidade do tipo CL (argila arenosa), enquanto que os solos dos blocos B02, B03 e B04 são classificados como SC (areias argilosas).

## **4.2. Ensaio de cisalhamento direto**

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com o objetivo de se definir os parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento.

Os ensaios foram realizados nas amostras B01, B02, B03 e B04 seguindo as recomendações de Lambe (1951). Foram realizados 51 ensaios de cisalhamento direto, sendo que cada envoltória de resistência foi determinada a partir de 3 ensaios com diferentes tensões normais. Realizaram-se ensaios em corpos-de-prova de solo e de solo/nata de cimento em umidade natural e submersos.

Nos ensaios de cisalhamento direto, a tensão normal no topo da amostra é aplicada através de uma placa rígida conectada a um pendural para suporte dos pesos. A carga cisalhante é transmitida ao corpo-de-prova através de um motor elétrico que desloca a parte inferior da caixa de cisalhamento a uma velocidade de deslocamento constante. A parte superior da caixa reage contra um anel dinamométrico que é utilizado para a determinação das tensões cisalhantes de ruptura.

Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto foram utilizadas prensas convencionais e um sistema automático de aquisição de dados.

### **4.2.1. Cisalhamento direto no solo**

Foram executados 6 ensaios convencionais de cisalhamento direto para cada bloco de solo, sendo 3 ensaios em corpos-de-prova submersos e 3 ensaios em amostras com teor de umidade natural, totalizando 24 ensaios. Este procedimento teve como finalidade estabelecer os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais ao longo do perfil de solo residual da encosta em estudo.

A Tabela 2 mostra as principais características dos corpos-de-prova dos ensaios realizados, tais como, tensão normal ( $\sigma_n$ ), teor de umidade inicial ( $w_i$ ) e final ( $w_f$ ), grau de saturação inicial ( $S_i$ ) e final ( $S_f$ ), peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) e seco inicial ( $\gamma_d$ ) e índice de vazios inicial ( $e_o$ ).

Tabela 2 - Características dos corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento direto em solo.

Amostra	Característica	Cisalhamento Natural			Cisalhamento Submerso		
		50	100	200	50	100	200
B01	$\sigma_n$ (kPa)	50	100	200	50	100	200
	$w_i$ (%)	14,19	14,86	14,59	16,59	15,24	14,43
	$w_f$ (%)	13,85	14,56	13,36	26,67	25,69	24,54
	$S_i$ (%)	46,60	45,20	42,00	46,20	49,10	51,10
	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,62	16,13	15,68	15,69	16,47	17,22
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,55	14,05	13,68	13,46	14,30	15,05
	$e_0$	0,82	0,89	0,94	0,94	0,86	0,84
B02	$\sigma_n$ (kPa)	50	100	200	50	100	200
	$w_i$ (%)	15,29	15,29	16,33	16,31	15,35	15,96
	$w_f$ (%)	14,00	15,17	15,25	17,60	17,01	17,06
	$S_i$ (%)	53,80	53,60	52,30	50,90	50,30	53,70
	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,29	17,27	18,07	17,89	16,77	18,45
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,00	14,98	15,53	15,38	14,54	15,96
	$e_0$	0,77	0,77	0,71	0,73	0,83	0,68
B03	$\sigma_n$ (kPa)	50	100	200	50	100	200
	$w_i$ (%)	17,60	17,01	17,06	17,31	16,52	17,34
	$w_f$ (%)	17,16	16,98	16,80	28,69	28,60	24,98
	$S_i$ (%)	54,60	57,10	55,2	52,10	54,70	53,20
	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,63	17,19	18,19	17,75	17,02	17,87
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,17	14,69	15,54	15,13	14,61	15,23
	$e_0$	0,87	0,81	0,71	0,75	0,82	0,74
B04	$\sigma_n$ (kPa)	50	100	200	50	100	200
	$w_i$ (%)	15,49	16,87	16,05	18,50	18,40	18,41
	$w_f$ (%)	15,46	16,35	18,49	27,63	25,94	25,40
	$S_i$ (%)	60,00	61,00	67,30	60,20	60,50	55,10
	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,67	17,74	18,06	17,11	17,23	17,23
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,43	15,18	15,25	14,49	14,55	14,84
	$e_0$	0,84	0,75	0,74	0,83	0,82	0,79

Os corpos-de-prova foram moldados com 101,6mm de lado e 20,0mm de altura.

Os ensaios eram executados com as tensões normais de 50, 100 e 200kPa (3 corpos-de-prova por bloco), totalizando 12 ensaios de cisalhamento

direto em condições submersas e 12 com teor de umidade natural. As fases de adensamento tiveram duração de 12h para os ensaios submersos e 4h para os ensaios na condição natural e serviram para a determinação da velocidade da fase de cisalhamento igual a 0,0487mm/min. Esta velocidade foi determinada segundo as recomendações de Gibson e Henkel (1954), de modo a garantir uma condição totalmente drenada durante a fase de cisalhamento.

O Apêndice 1 mostra as curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta h$ ) e deslocamento vertical ( $\delta v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta h$ ) obtidas para as amostras dos blocos B01, B02, B03 e B04, nas condições de umidade natural e submersa.

Em alguns casos, as curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta h$ ) mostram a inexistência de pico de resistência para determinados níveis de tensão normal. Desta forma, adotou-se como critério de ruptura do solo, o nível correspondente à inclinação constante da curva tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta h$ ). Este critério de ruptura também foi adotado por Campos & Carrillo (1995) em ensaios de sucção controlada e ensaios submersos em amostras indeformadas de solo residual, cujos resultados também indicavam a ausência de picos.

Os resultados de cisalhamento direto em corpos de prova submersos, de uma maneira geral, não apresentaram pico, exibindo compressão volumétrica durante toda a fase de cisalhamento, com exceção dos ensaios realizados na amostra do bloco B02 com tensão vertical de 50kPa, onde se nota um pico acentuado na curva tensão versus deslocamento horizontal e o material apresenta uma expansão volumétrica durante o cisalhamento.

Por outro lado, os ensaios realizados em corpos-de-prova na umidade natural (não submerso) apresentaram um pico acentuado para os primeiros estágios de carregamento, variando de acordo com a profundidade de extração das amostras.

Na amostra B01 em estado natural não se verificou pico para nenhum nível de tensão, indicando um comportamento de material normalmente adensado. As amostras dos blocos B02, B03 e B04 mostraram comportamentos similares, apresentando um pico bem definido para as tensões verticais de 50 e 100kPa e indicando um comportamento semelhante ao de materiais pré-adensados.

Note-se, porém, que a sucção que ocorre no material não saturado não é conhecida e pode atingir um valor relevante. Desta forma, não é apropriado definir a tensão média de pré-adensamento do material quando ensaiado na umidade natural.

As envoltórias dos ensaios de cisalhamento direto das amostras dos blocos B1 a B4 nas condições natural e submersa são apresentadas nas Figuras 49 a 52, respectivamente. A

Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência.

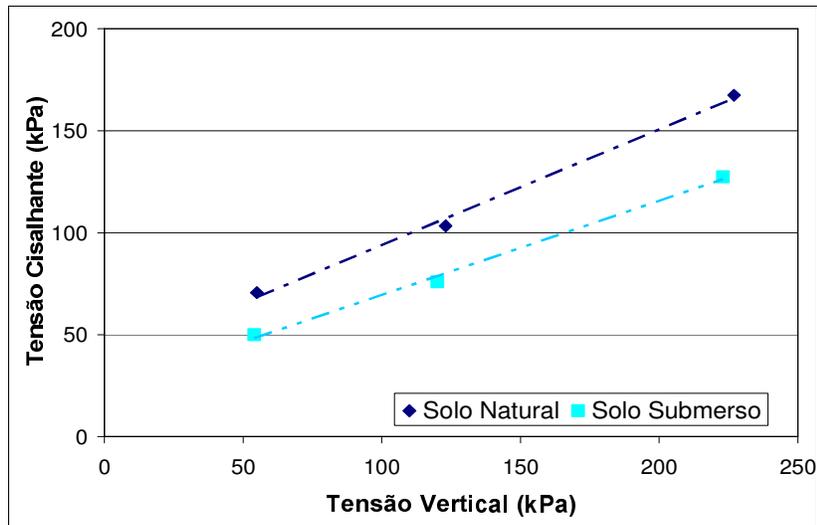


Figura 3 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo B01.

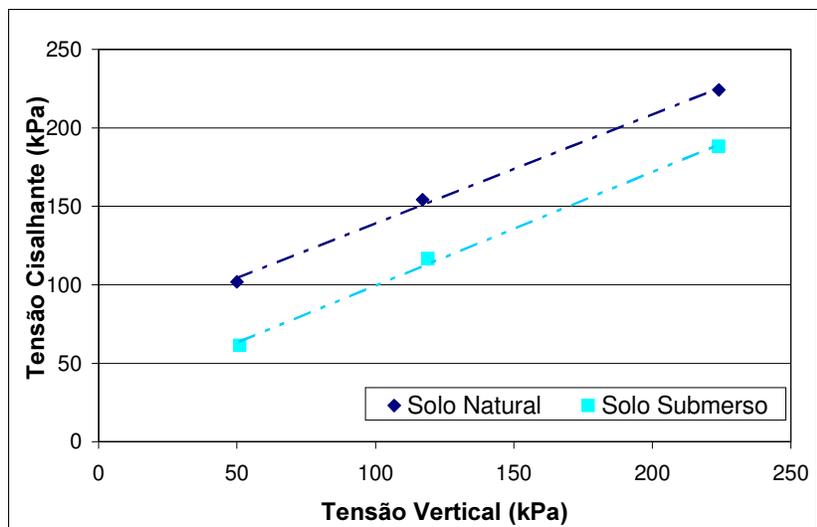


Figura 4 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo B02.

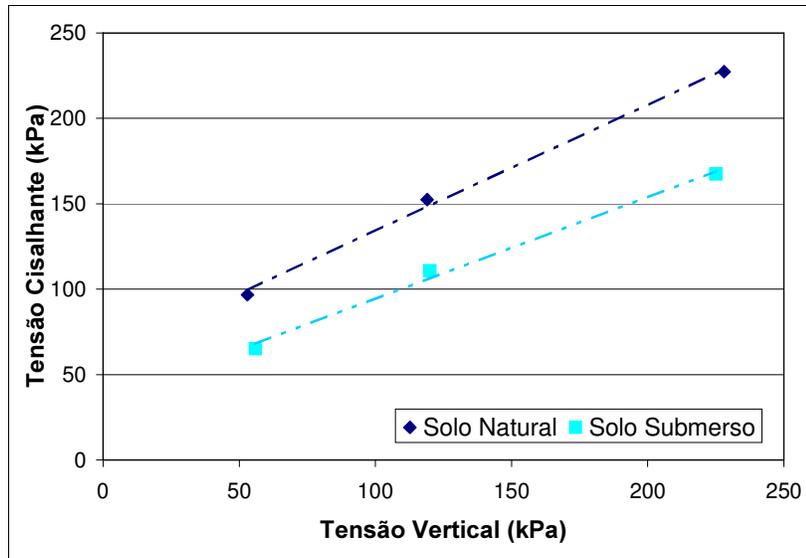


Figura 5 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo B03.

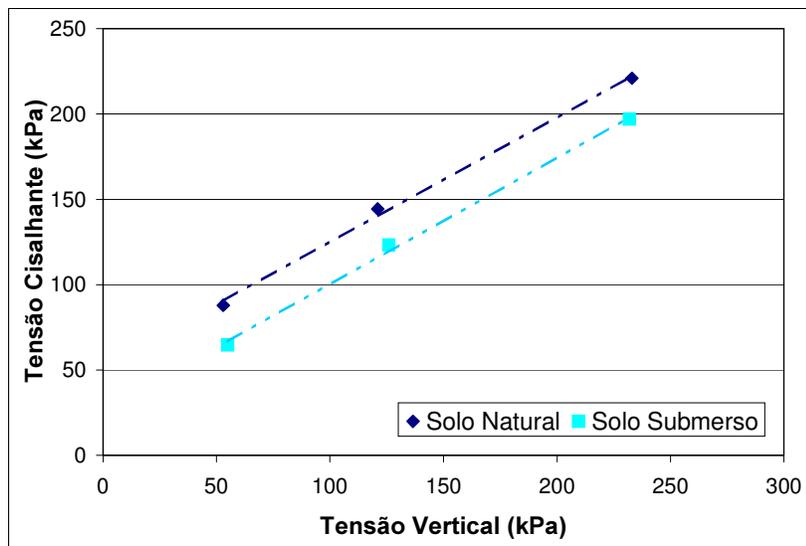


Figura 6 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo B04.

A

Tabela 3 apresenta os resultados de coesão e ângulo de atrito para os solos em estudo, nas condições de umidade natural e submersa. É importante destacar que os coeficientes de linearidade ( $R^2$ ) das envoltórias dos solos em estudo foram superiores a 0,99.

Tabela 3 - Parâmetros de resistência dos solos

Amostra	Condição	Ângulo de atrito	Coesão (kPa)
B01	Natural	29,6°	36,4
	Submersa	24,9°	22,3
B02	Natural	36,1°	69,1
	Submersa	34,9°	26,4
B03	Natural	36,4°	61,2
	Submersa	33,8°	28,4
B04	Natural	36,6°	51,5
	Submersa	36,3°	25,8

Através dos envoltórias de resistência e dos dados apresentados na Tabela 3, nota-se uma similaridade nos valores das amostras dos blocos B02, B03 e B04, como o esperado, pois os materiais destes blocos apresentam as mesmas características.

#### 4.2.2. Cisalhamento direto na interface solo-cimento

Com o objetivo de se avaliar a resistência da interface solo/nata de cimento, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras compostas por estes dois materiais, sendo a superfície de ruptura coincidente com a interface.

##### 4.2.2.1. Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova eram moldados a partir das amostras indeformadas (B01, B02, B03 e B04), utilizando-se o mesmo amostrador do ensaio de cisalhamento direto, sendo regularizado no topo e na base.

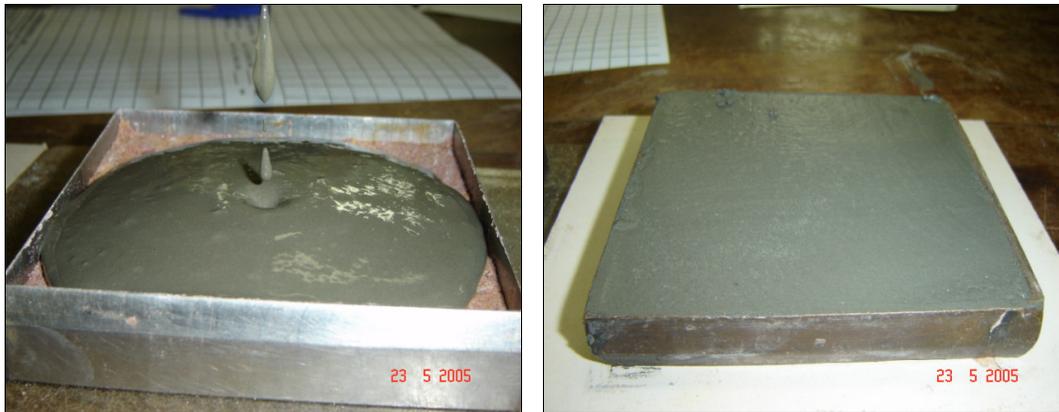
Para facilitar a moldagem e garantir a mesma altura para os dois materiais (10mm), foi utilizado um molde de madeira com lados de 9,5cm e altura de 10mm, o qual servia para extrair a metade superior de solo (Figura 7).

Em seguida, o amostrador era tirado deste gabarito e invertido, as condições de rugosidade da interface eram simuladas e o espaço era preenchido com a nata de cimento (Figura 8). O conjunto era protegido por

papel-filme e levado à câmara úmida. Após 3 dias, procedia-se a regularização da superfície de nata de cimento, utilizando-se parafina quente para o preenchimento de eventuais retrações durante a cura e garantir alturas exatamente iguais das duas partes do conjunto.



Figura 7 – Corpo-de-prova no molde para o faceamento da metade superior.



(a)

(b)

Figura 8 – Moldagem dos corpos-de-prova: (a) preenchimento do amostrador com nata de cimento; (b) conjunto antes da fase de cura.

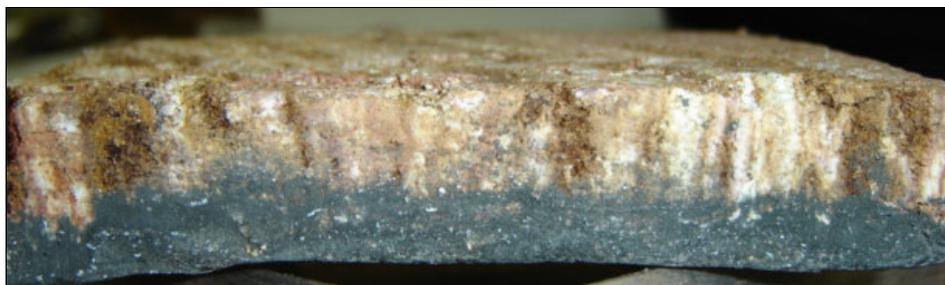


Figura 9 – Vista lateral do corpo-de-prova de interface solo/nata de cimento.

#### 4.2.2.2.

#### Preparação da nata de cimento

Os procedimentos de preparação da nata de cimento eram idênticos aos realizados no caso de obra estudado. A nata de cimento era preparada com cimento Portland com fator água/cimento igual a 0,6. Para moldagem de cada corpo-de-prova de cisalhamento direto eram necessários 100 gramas de cimento onde eram adicionados 60ml de água e misturados através de agitação manual com o auxílio de uma espátula.

Magalhães (2005) realizou ensaios para a resistência da nata de cimento nestas condições. Foram realizados ensaios de tração diametral (ensaio brasileiro) em corpos-de-prova com 5cm de diâmetro e altura de 2,5cm e ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova com 5cm de diâmetro e 10cm de altura. Os resultados de resistência à tração ( $\sigma_t$ ) e compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência à tração e à compressão uniaxial da nata de cimento

Corpo-de-Prova	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)
CP 01	0,98	11,10
CP 02	0,71	11,11
CP 03	1,02	9,63
CP 04	1,19	10,96
<b>Média</b>	0,98	10,70

### 4.2.2.3. Definição da rugosidade dos corpos-de-prova

Os parâmetros de resistência da interface são diretamente afetados pelas condições de rugosidade impostas na superfície de contato entre os dois materiais.

As condições de rugosidade nos ensaios de cisalhamento direto foram similares às condições obtidas da análise feita em grampos submetidos a ensaios de arrancamento que foram exumados por Magalhães (2005). A rugosidade da nata de cimento era imposta na interface nata/solo através de sulcos executados com estilete em diversas direções (Figura 10). Após a execução dos ensaios, os corpos-de-prova eram analisados com o objetivo de verificar se as rugosidades simuladas correspondiam às condições reais de campo da interface grampo/maciço terroso.



Figura 10 - Simulação da rugosidade no contato solo/nata de cimento.

A Figura 11 ilustra a semelhança de aspectos entre a interface solo/nata de cimento da amostra de laboratório e a superfície dos grampos submetidos aos ensaios de arrancamento no campo, os quais foram exumados e analisados por Magalhães (2005).



Figura 11 Comparação das rugosidades: (a) grampos exumados em campo; (b) interface solo/nata de cimento no laboratório.

#### 4.2.2.4. Execução dos ensaios de interface

Os ensaios de cisalhamento direto de interface consistiram, basicamente, em deslocar a metade inferior do corpo-de-prova (nata de cimento) em relação à metade superior (solo), determinando-se, assim, para cada tensão normal, o valor do esforço cortante necessário para provocar a ruptura na interface solo/nata de cimento.

Os procedimentos de ensaio foram exatamente os mesmos adotados para os ensaios de cisalhamento nos corpos-de-prova compostos somente por solo. Foram realizados ensaios com interfaces nas condições submersa e natural dos blocos B01, B02, B03 e B04.

Para evitar que a interface solo/nata de cimento não coincidisse com a superfície de ruptura após o adensamento do solo, os corpos de prova foram colocados na caixa de cisalhamento com a nata de cimento na parte inferior.

A Figura 12 ilustra uma amostra com interface solo/nata de cimento após o ensaio de cisalhamento direto. Os resultados dos ensaios são apresentados através das curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta h$ ) e deslocamento vertical ( $\delta v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta h$ ), obtidas para as amostras dos blocos B01, B02, B03 e B04, em condições de umidade natural e submersa (Apêndice 2).



Figura 12 - Corpo-de-prova de interface solo/nata de cimento após o ensaio.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto nas interfaces indicam um comportamento similar para todas as amostras. Observa-se um pico de tensão cisalhante para pequenos deslocamentos horizontais e, em seguida, um patamar estável de resistência ao longo do ensaio.

Em alguns casos específicos, observa-se um crescimento linear da resistência nos primeiros instantes do ensaio até o pico de ruptura. Este comportamento pode ser atribuído à presença de nata de cimento nas laterais do corpo-de-prova, formando uma camada esbelta nas bordas (Figura 13), que impediu a ocorrência do cisalhamento na interface solo/nata de cimento nestes primeiros instantes do ensaio.



Figura 13 – Detalhe de um corpo-de-prova com nata de cimento nas bordas.

As curvas deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) geralmente mostram compressão volumétrica dos corpos-de-prova ao longo dos ensaios, exceto no ensaio com tensão vertical de 50kPa da amostra B02 na condição submersa. Este ensaio também não mostrou o pico característico de

resistência, evidente nos outros ensaios. Provavelmente, neste ensaio, a superfície de cisalhamento não coincidiu com a interface solo/nata de cimento, ocorrendo somente ruptura de solo. Por outro lado, os ensaios realizados em corpos-de-prova na umidade natural (não submerso) apresentaram um pico acentuado para os primeiros estágios de carregamento, variando de acordo com a profundidade de extração das amostras.

As envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto em corpos-de-prova com interface solo/nata de cimento nas condições natural e submersa das amostras dos blocos B1 a B4 são apresentadas nas Figuras 60 a 63, respectivamente. A Tabela 5 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência.

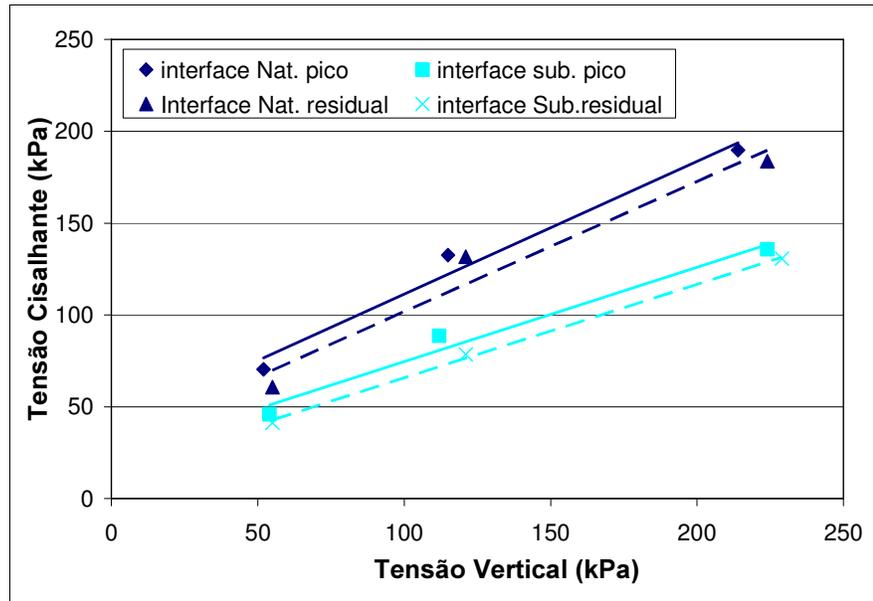


Figura 14 - Envoltória de resistência ao cisalhamento da interface solo/nata de cimento – B01.

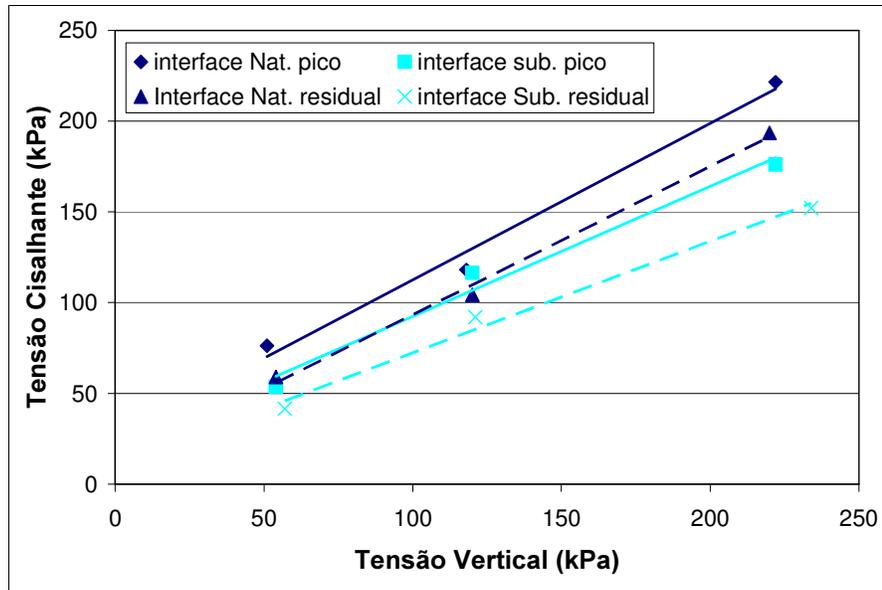


Figura 15 - Envoltória de resistência ao cisalhamento da interface solo/nata de cimento - B02.

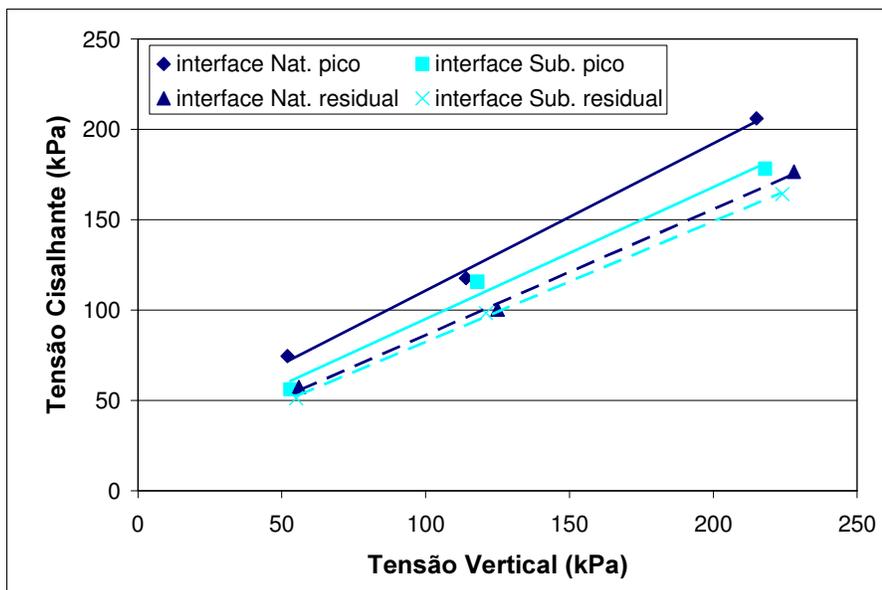


Figura 16 - Envoltória de resistência ao cisalhamento da interface solo/nata de cimento - B03.

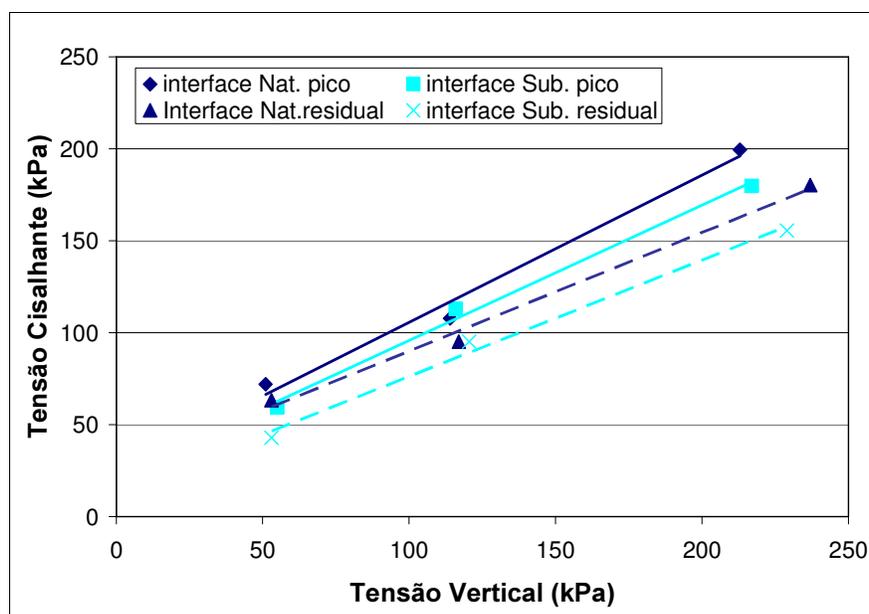


Figura 17 - Envoltória de resistência ao cisalhamento da interface solo/nata de cimento - B04.

Tabela 5 – Parâmetros de resistência da interface solo/nata de cimento

Solo/nata de cimento		Resistência de pico		Resistência residual	
Amostra	Condição	Adesão (kPa)	Ângulo de atrito	Adesão (kPa)	Ângulo de atrito
B01	Natural	39,1	35,8°	31,0	35,3°
	Submersa	23,3	27,2°	14,7	27,0
B02	Natural	26,2	40,8°	11,8	39,2
	Submersa	20,8	35,6°	10,9	31,6
B03	Natural	29,4	39,1°	16,6	34,8°
	Submersa	22,0	36,1°	15,8	33,7°
B04	Natural	25,68	38,6°	25,4	32,8°
	Submersa	22,28	36,3°	13,0	32,3°

Analisando os dados da Tabela 5, observa-se a mesma semelhança apresentada nos ensaios de cisalhamento direto dos solos. Nota-se que as amostras de solo do bloco B01 apresentam uma coesão superior que as amostras dos blocos B02, B03 e B04.

### 4.3. Resultados de cisalhamento direto

A análise dos ensaios de cisalhamento das amostras, nas condições natural e submersa, solo/nata de cimento e solo/solo, permite algumas conclusões.

Verifica-se que ocorre um decréscimo no valor da coesão na interação solo-nata de cimento em relação à interação solo/solo para as diferentes amostras estudadas. Observa-se um decréscimo considerável nos valores de coesão quando comparados os ensaios de cisalhamento direto na interação solo/solo nas condições natural e submersa, apresentando uma tendência de variação com a sucção.

Nos ensaios de cisalhamento direto solo/solo, observou-se que o ângulo de atrito não apresenta tendência de variação para as diferentes condições de ensaio (natural e submersa). Quanto à profundidade, o ângulo de atrito varia da cota 35m para as demais cotas de estudo. No entanto, nos ensaios de cisalhamento direto realizado nas amostras de solo/nata de cimento, verificou-se uma pequena variação do ângulo de atrito com redução de seu valor com a saturação do corpo-de-prova.

Observa-se a variação dos valores de resistência ao cisalhamento quando comparados os ensaios das amostras dos blocos B01 com as demais amostras. Nos ensaios da interação solo/solo, nota-se que os parâmetros de resistência das amostras do bloco B01 são inferiores aos parâmetros das amostras dos outros blocos, podendo ser atribuído ao fato de se tratar de um solo residual maduro.

Em relação aos ensaios de interface solo/nata de cimento na condição natural, os ensaios realizados nas amostras do bloco B01 apresentam parâmetros de resistência mais elevados que os das demais amostras. Isto ocorre provavelmente pela maior penetração de nata de cimento nos vazios do solo. Porém, observa-se que a amostra de solo do bloco B01 apresenta uma queda acentuada nos parâmetros de resistência na condição submersa. Possivelmente, a presença de água quebra as ligações físicas da interface solo/nata de cimento, e a adesão e ângulo de atrito diminuem consideravelmente. Enquanto que a redução dos parâmetros de resistência nas amostras dos blocos B02, B03 e B04 são menos acentuadas com a presença de água