

## 6 Curva Característica de Sucção - Resultados

### 6.1. Introdução

Na avaliação das propriedades hidráulicas dos solos não saturados relativas à retenção de umidade pelos mesmos, foram utilizados diferentes materiais: os solos residuais correspondentes ao perfil de alteração de Gnaiss descrito no Capítulo 2 (item 2.5.2), um solo residual de Sienito, uma amostra de solo residual de Filito, um solo sedimentar e um solo coluvionar.

### 6.2 Caracterização dos materiais

Algumas das características dos solos analisados estão apresentadas nas Tabelas 6.1 e 6.2. Detalhes sobre os mesmos podem ser encontrados nas referências indicadas na Tabela 6.1. As características dos materiais do perfil de alteração de gnaiss foram apresentadas no Capítulo 2.

Tabela 6.1 – Características Gerais dos Solos

Solo	Procedência	Referência
Residual de Sienito	Poços de Caldas, MG	Carvalho, 2006
Residual de Filito	Belo Horizonte, MG	Lopes, 2006
Coluvionar	Rio de Janeiro, RJ	Soares, 2005
Sedimentar	São Luiz, MA	Moncada, 2004

Tabela 6.2 – Caracterização Física dos Solos

Solo	Granulometria (%)				Gs	Plasticidade (%)	
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila		w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>
Residual de Sienito	0,0	17,1	55,4	27,5	2,627	59,3	43,8
Residual de Filito	0,0	22,1	62,6	15,3	2,700	37,0	30,4
Coluvionar	0,9	40,1	5,5	53,5	2,736	54,0	27,8
Sedimentar	0,0	77,0	8,0	13,0	2,670	-	-

### **6.3. Curva Característica de Sucção**

As curvas características de sucção dos materiais foram essencialmente determinadas pelo método do papel filtro, sendo que para os pontos abaixo de 300kPa foram utilizadas a placa de pressão e a placa de sucção. Utilizou-se também a sonda de umidade relativa e dados obtidos a partir dos resultados do ensaio de porosimetria. Finalmente os dados experimentais foram ajustados com os modelos de van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994) e Kosugi (1999), que foram apresentados no Capítulo 3.

#### **6.3.1. Procedimentos de ensaio:**

##### **6.3.1.1 Método do Papel Filtro**

Os corpos de prova para a execução do ensaio foram moldados com anéis de aço inox de 50mm de diâmetro e 20mm de altura. Utilizou-se um anel para cada ponto da curva. A partir da umidade natural, os corpos de prova foram umedecidos ou secados para obter o teor de umidade desejado, deixando equalizar a nova umidade por um período mínimo de 2 dias. Determinou-se para todas as curvas o ponto correspondente à umidade higroscópica. Para isto, deixou-se o anel correspondente secar ao ar até ter-se constância de massa.

O papel filtro utilizado foi o Whatman 42, na condição de seco ao ar (ou seja, retirado diretamente da caixa). Conforme o comentado no Capítulo 5, previamente ao início dos ensaios foi confirmada a calibração do papel filtro, mediante a aplicação de dois valores de sucção conhecidos na placa de pressão. Os resultados destes dois pontos confirmaram que a calibração proposta por Chandler et al. (1992) era apropriada para o lote de papel filtro utilizado, pelo qual não se considerou necessário executar uma calibração do papel. Verificou-se também o valor de umidade do papel filtro na condição de seco ao ar para se ter certeza de que ele estava trabalhando sempre em uma trajetória de umedecimento. O valor obtido para o lote utilizado foi de 6,35%, isto permite medições de sucção de até 28000kPa aproximadamente. Esta é a máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do solo.

Com o corpo de prova na umidade desejada, um papel filtro era colocado em contato com cada uma das superfícies da amostra, nas determinações de sucção matricial. O conjunto era embrulhado com várias camadas de filme

plástico, seguida por uma camada de papel alumínio. Após, identificado exteriormente, cada pacote era colocado dentro de uma caixa de isopor. Esta caixa de isopor era mantida numa sala com temperatura controlada (ar condicionado) durante o período de estabilização, que foi estabelecido em 7 / 10 dias. Após este período os pacotes eram abertos ao lado de uma balança de 4 casas decimais (0,0001g), registrando o peso dos mesmos durante 1 minuto, de 10 em 10 segundos, para obter o peso no tempo zero. Logo após a pesagem os papéis filtros eram levados à estufa (100-110 °C) por um período mínimo de 2 horas. Uma vez secos, os papéis eram novamente pesados, com a mesma metodologia que no caso úmido.

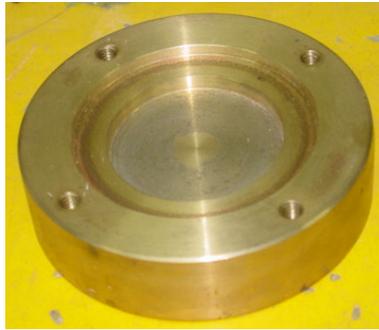
A umidade dos corpos de prova foi determinada por secagem em estufa a 110 °C. Com a umidade dos papéis filtros e a curva de calibração de Chandler et al. (1992) foram determinados os valores de sucção. Para automatizar o cálculo das curvas de sucção, tanto na fase de preparação quanto de análises dos resultados, foram desenvolvidas planilhas de Excel específicas, com macros associadas.

Para cada corpo de provas são obtidos dois valores de sucção matricial, correspondentes com o papel filtro do topo e da base. Os valores obtidos foram representados em um gráfico e ajustados por uma função linear. Aqueles pontos que estão muito afastados da reta de ajuste ( $R^2 < 0,98$ ) são eliminados e os resultados do ensaio correspondente desconsiderados no cálculo da curva característica de sucção.

### 6.3.1.2

#### **Método da Umidade Relativa**

Nos ensaios com determinação da umidade relativa, como já foi comentado no Capítulo 5, o fator que mais influencia na resposta das sondas é a variação da temperatura. Foram feitas várias tentativas para minimizar esta influência, começando com a medição sem nenhum isolamento, seguindo-se a utilização de um recipiente hermeticamente fechado (Figura 6.1) e, finalmente, colocando o conjunto recipiente-solo-sonda em uma caixa de isopor. Esta última medida foi a que se mostrou mais eficiente na minimização das variações de temperatura (Figura 6.4). Na Figura 6.2 tem-se a resposta das sondas sem nenhum tipo de isolamento térmico e na Figura 6.3 com a utilização do recipiente vedado. Os testes mostrados nas figuras foram efetuados com uma solução de NaCl com RH conhecido de 98%.



Base Recipiente



Anel de solo e Anel do Recipiente

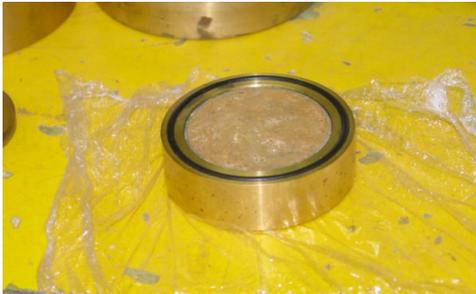
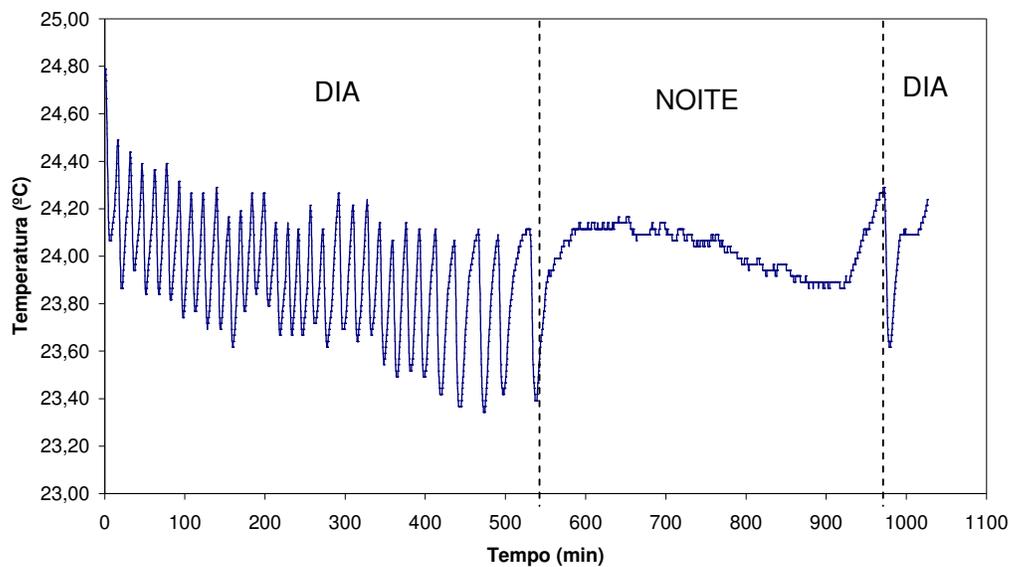
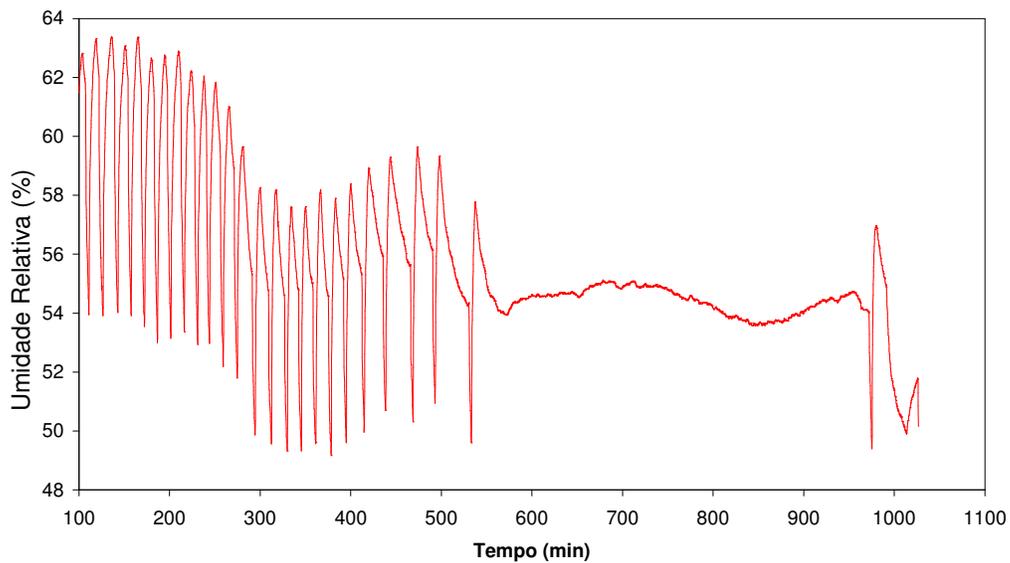


Figura 6.1 – Determinação da Umidade Relativa – Montagem do ensaio (Sonda e Datalogger Ahlborn)

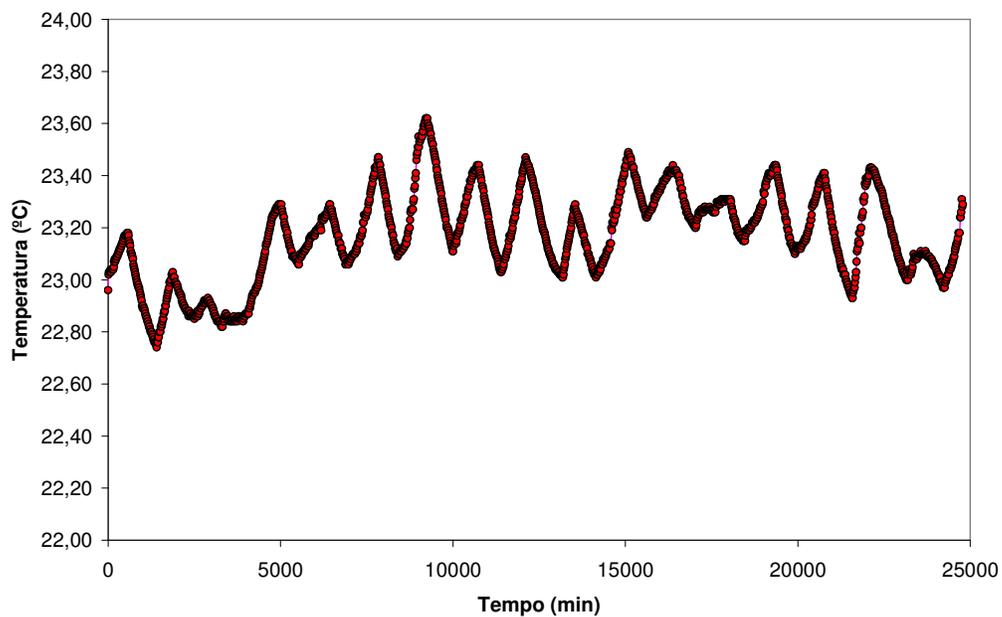


a) Variação da temperatura

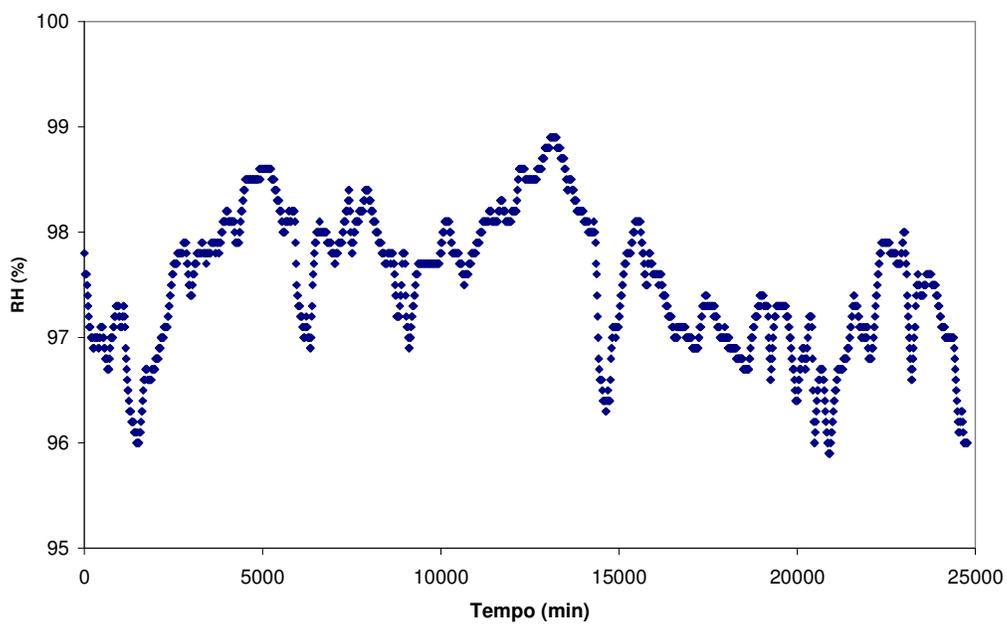


b) Variação da Umidade Relativa

Figura 6.2 - Resposta da sonda sem isolamento (Sonda PUC)



a) Variação da temperatura



b) Variação da Umidade Relativa

Figura 6.3 – Resposta da sonda com a utilização do recipiente (Sonda Ahlborn)

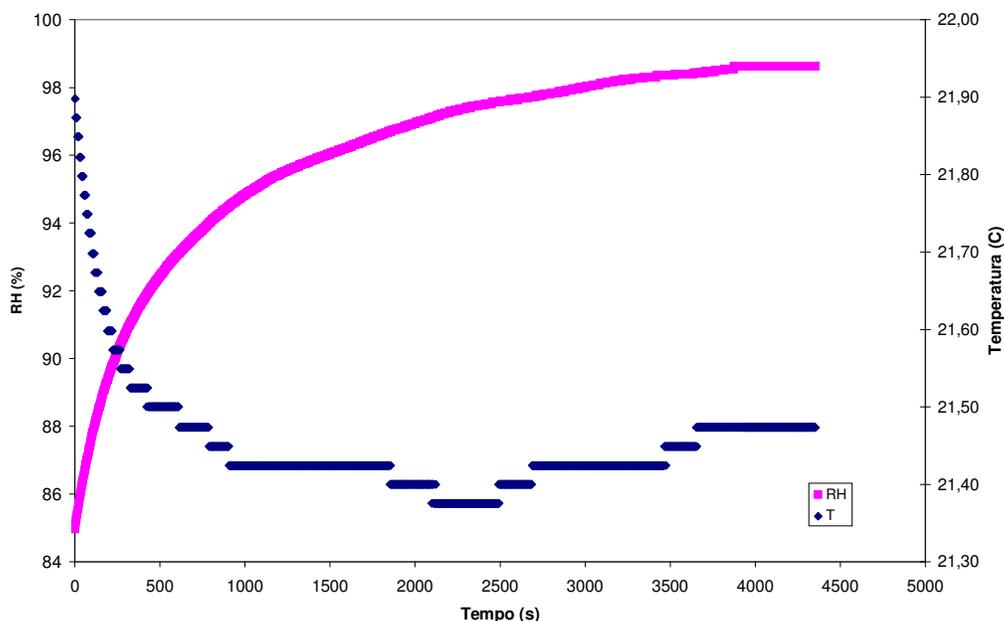


Figura 6.4 – Resposta da sonda com a utilização do recipiente e a caixa de isopor (Sonda PUC)

Foram feitos ainda, na etapa de calibração das sondas, testes para avaliar a influência da distância entre a superfície da solução e a sonda no tempo necessário para atingir o equilíbrio, para isto trabalhou-se novamente com uma solução de NaCl de umidade relativa conhecida (97,90%). Os tempos necessários estão mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Tempo necessário para o equilíbrio

Distância Sonda – Superfície Solução (mm)	Tempo (min)
2,00	54
10,00	2590

Como pode observar-se da Tabela, a distância entre a sonda e a superfície da solução influencia fortemente no tempo necessário para atingir o equilíbrio de umidade relativa. Em função destes resultados, a separação adotada nos ensaios foi de 2mm entre o sensor e a superfície do corpo de prova.

Depois desta etapa de ajuste inicial, os ensaios foram executados sem maiores inconvenientes, os tempos de equilíbrio necessários variaram de 3,5 até 20 dias, dependendo do solo testado e do valor da sucção. Nas Figuras 6.5 a 6.8 estão apresentados os registros de leituras para os diferentes materiais ensaiados.

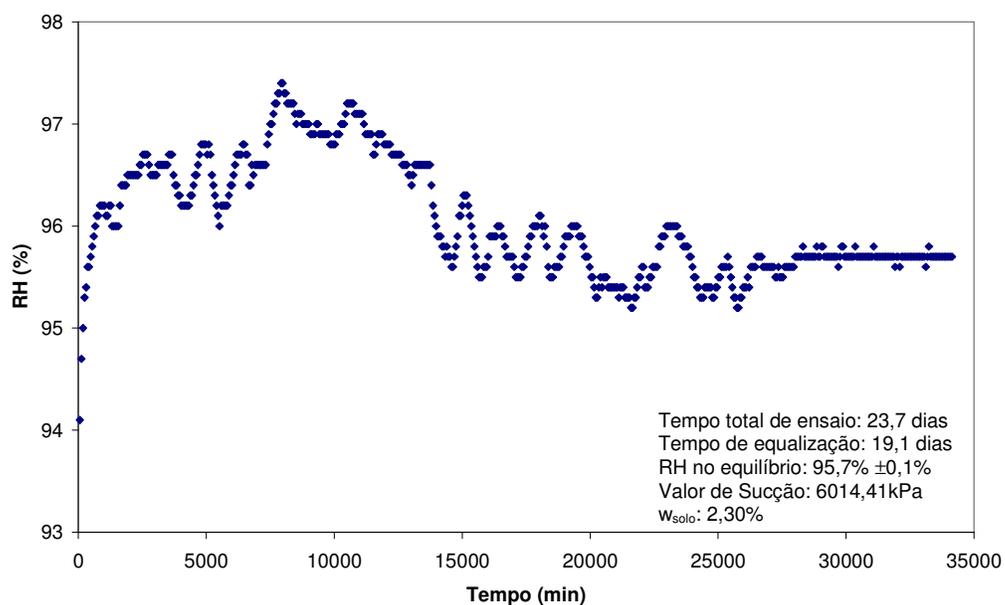


Figura 6.5 – Medição de Umidade Relativa – Solo Sedimentar do Maranhão (Sonda PUC).

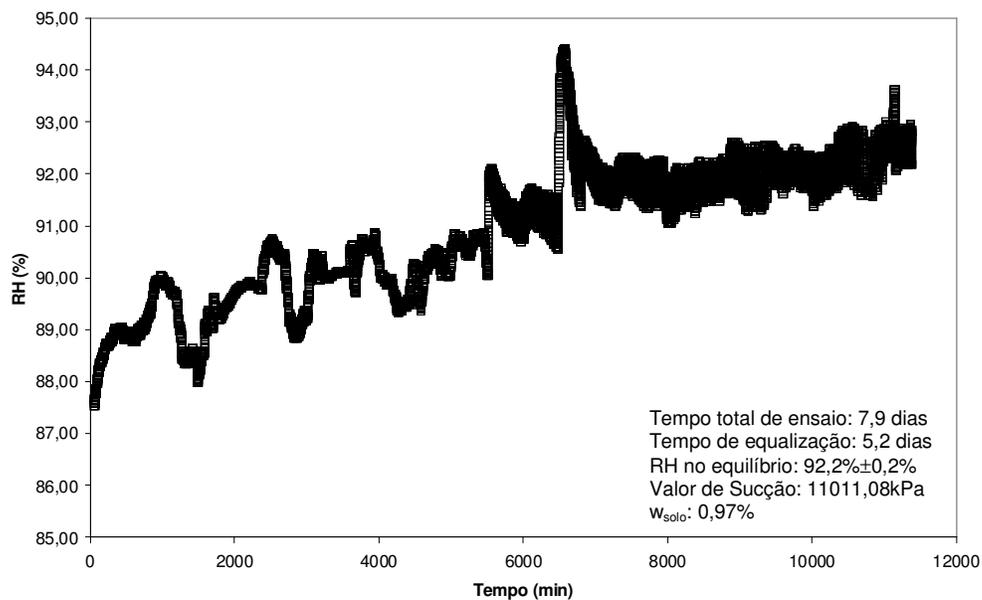


Figura 6.6 – Medição de Umidade Relativa – Solo Sedimentar do Maranhão (Sonda PUC).

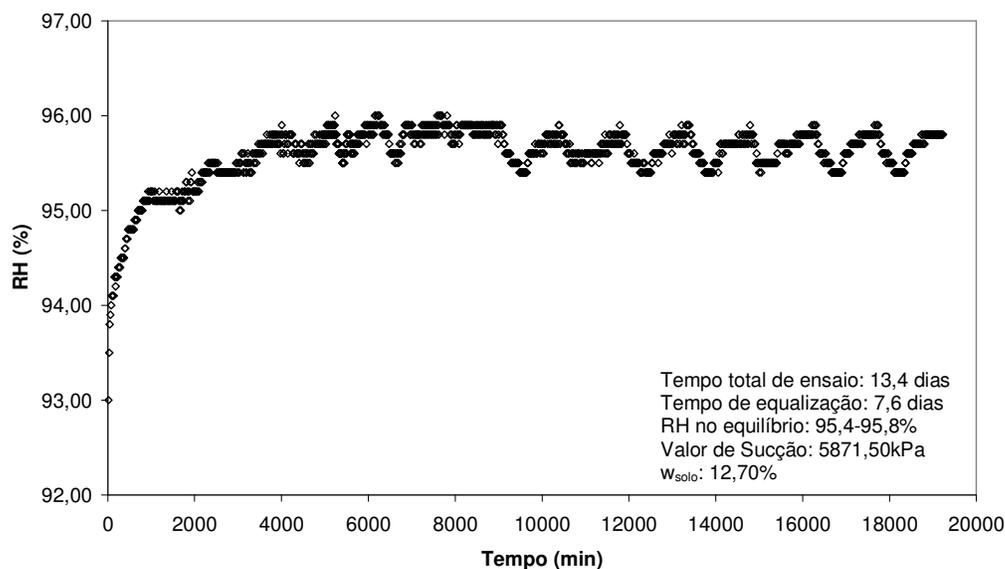


Figura 6.7 – Medição de Umidade Relativa – Solo Residual de Gnaiss B1 (Sonda Ahlborn).

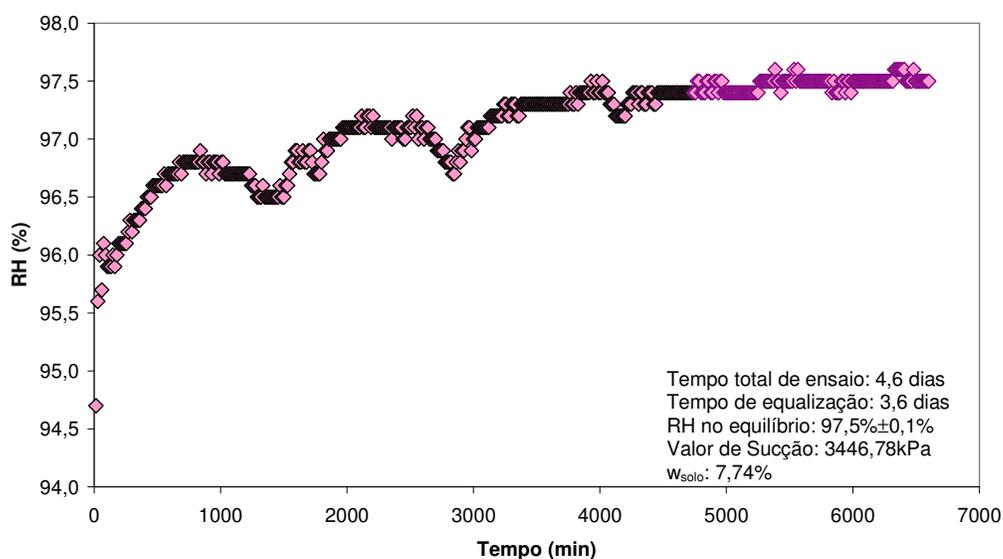


Figura 6.8 – Medição de Umidade Relativa – Solo Residual de Gnaiss B2 (Sonda Ahlborn).

Existe uma relação entre o tempo necessário e a sucção. No caso do Solo sedimentar do Maranhão, nas Figuras 6.5 e 6.6 observa-se que quanto maior é a sucção (menor umidade relativa) mais rapidamente é atingido o estado de equilíbrio. Em outras palavras, o tempo necessário para o equilíbrio é inversamente proporcional à sucção total. Isto é coerente com o comportamento informado por Marinho (1994) com respeito aos tempos necessários para a medição de sucção total. Para a mesma faixa de sucção (umidade relativa) os tempos necessários registrados foram diferentes para o Solo Sedimentar do

Maranhão (Figura 6.5) e para o Solo Residual B1 (Figura 6.7). Isto pode estar relacionado com o conteúdo de umidade dos solos e a posição do ponto na curva característica. Como as sondas utilizadas foram diferentes, esta comparação deve ser feita com precaução, pois os tempos registrados podem ter sido influenciados pela sensibilidade do sensor e não necessariamente pelas características do material. Novos testes são necessários para avaliar esta relação.

As sondas mostraram-se eficientes até umidades relativas de 98%. Acima deste limite, pequenas variações de temperatura provocaram a condensação da água sobre a superfície do sensor, provocando a medição de umidades relativas de 100%. Um exemplo deste comportamento está mostrado na Figura 6.9. Vários ensaios foram perdidos pela condensação de água na superfície do sensor.

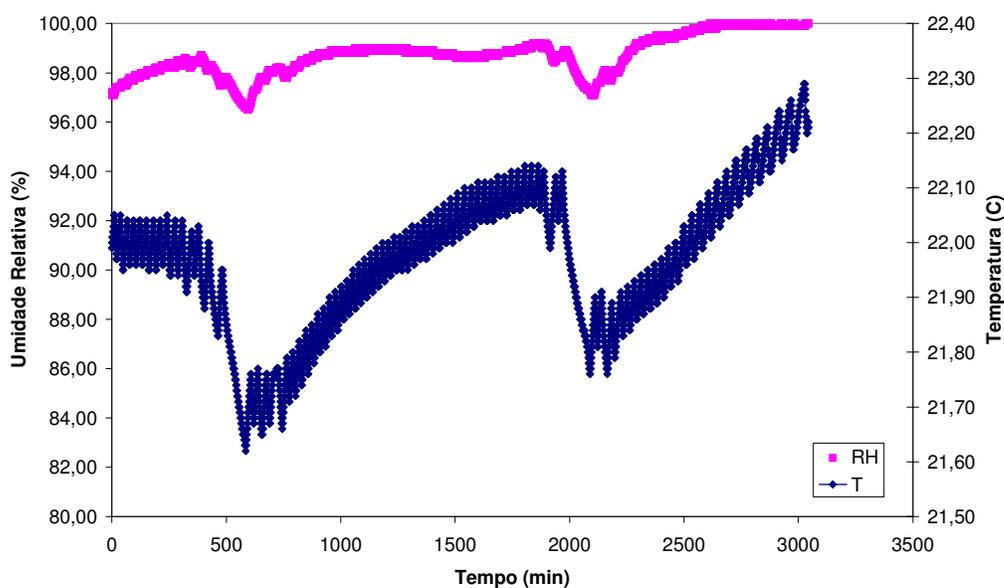


Figura 6.9 – Resposta da sonda para umidades relativas > 98% (Sonda Ahlborn)

### 6.3.2. Resultados

A seguir são apresentados os resultados das curvas características de sucção obtidos para cada material, combinando as diferentes técnicas. Nas Tabelas estão indicados os pontos determinados utilizando Placa de Sucção, Placa de Pressão e Umidade Relativa.

Em alguns dos materiais foram determinados também os valores de sucção total, pelo método do papel filtro. Neste caso foram utilizadas as câmaras

de equalização (Vilar, 2000; Moncada, 2004), com os tempos de equilíbrio correspondem com os citados no Capítulo 5 (mínimo de 15 dias).

As trajetórias apresentadas foram determinadas a partir da umidade natural (legenda Matricial-C nas Figuras e nas Tabelas), obtida conforme o descrito no item 6.3.1.1. As determinações de sucção total estão identificadas com a Legenda Total nas Figuras e nas Tabelas correspondentes.

### 6.3.2.1

#### Perfil de Alteração de Gnaiss – São Gonçalo

Serão apresentados a seguir os valores correspondentes com os materiais do perfil de alteração de Gnaiss. Nestes solos não foi observada variação de volume como consequência dos procedimentos de umedecimento e/ou secagem utilizados na preparação das amostras.

Nas Tabelas estão informados os valores obtidos pelas diferentes técnicas, além dos valores dos parâmetros físicos correspondentes com cada anel de solo. Nas Figuras estão apresentados os teores de umidade gravimétrica em função do valor de sucção. As representações usando teores de umidade volumétrica e grau de saturação só foram utilizadas quando a relação linear entre a umidade gravimétrica e a volumétrica e/ou grau de saturação apresentou valores de  $R^2 < 0,98$ . Valores menores que 0,98 indicam variações importantes no índice de vazios ( $e$ ).

Tabela 6.4 – Dados Experimentais B0 – Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		$e$	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			KPa	kPa		
3,63	5,79	13,98	26143,36	25895,50	0,706	1,595
8,19	13,71	35,66	15230,13	13830,81	0,625	1,674
8,22	12,84	30,17	14290,41	13944,04	0,741	1,563
10,13	16,55	41,39	12953,93	12943,25	0,666	1,633
11,29	18,69	47,72	12261,62	11615,76	0,644	1,655
13,23	22,36	58,98	10490,49	9735,84	0,611	1,690
20,75	32,58	77,02	2948,49	2420,78	0,733	1,570
23,34	35,14	78,66	1648,50	1517,56	0,808	1,505
24,56	39,28	95,27	8,06	(1)	0,701	1,599
24,83	38,64	90,26	209,01	118,59	0,749	1,556
27,13	41,79	96,31	5,82	7,38	0,767	1,540

(1) Determinação em Placa de Sucção

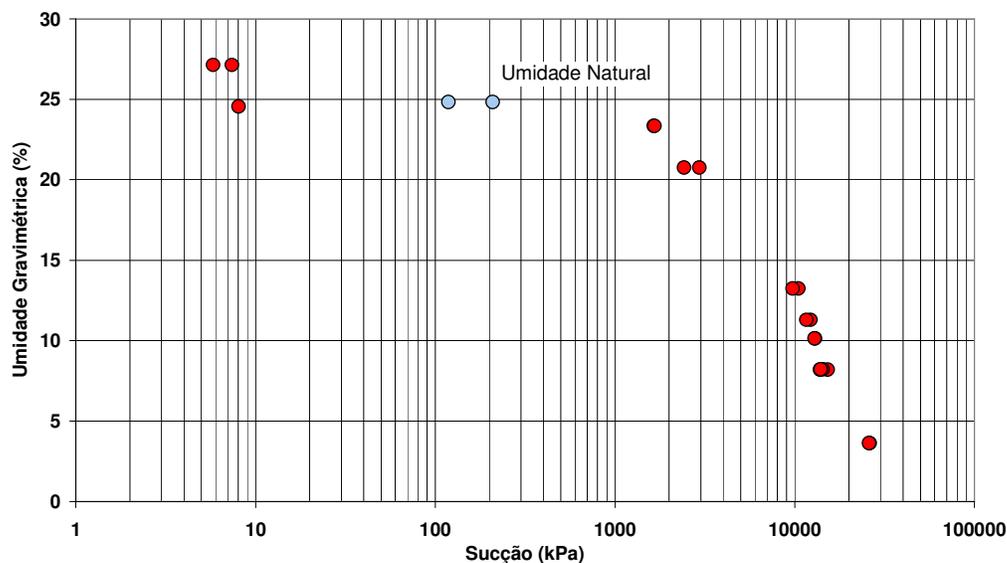


Figura 6.10 – Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B0

Tabela 6.5 – Dados Experimentais B1 – Sucção Matricial – C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			kPa	Kpa		
3,92	6,11	14,58	25409,90	26466,55	0,722	1,560
4,22	6,44	14,92	25587,13	25148,55	0,759	1,527
5,09	7,91	18,77	20704,49	19937,15	0,729	1,553
8,71	13,43	31,54	15252,78	14813,96	0,741	1,543
12,19	19,12	45,98	11253,16	9252,27	0,712	1,569
12,70	19,73	46,87	5871,5	(1)	0,729	1,552
13,54	20,89	49,06	11046,95	10991,12	0,742	1,542
14,02	21,74	51,47	11101,70	10467,58	0,732	1,551
18,34	28,85	69,59	4059,93	3776,95	0,708	1,573
19,22	31,22	79,02	998,21	1068,74	0,753	1,525
21,10	32,93	78,58	406,49	402,20	0,721	1,560
23,55	38,97	100,00	22,45	(2)	0,723	1,555
23,80	37,79	92,44	215,59	210,70	0,692	1,588

(1) Determinação pela Umidade Relativa, (2) Determinação em Placa de Sucção.

Tabela 6.6 – Dados Experimentais B1 – Sucção Total

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Total (kPa)	e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
3,39	5,19	12,03	23557,85	0,758	1,528
5,87	9,11	21,57	14215,50	0,731	1,552
9,43	14,55	34,20	10344,57	0,740	1,543
12,25	19,23	46,26	8598,98	0,711	1,570
15,08	23,27	54,68	7122,98	0,741	1,543
19,52	31,01	75,90	1463,26	0,691	1,589
22,95	35,83	85,56	36,55	0,720	1,561
23,00	36,19	87,37	432,32	0,707	1,573

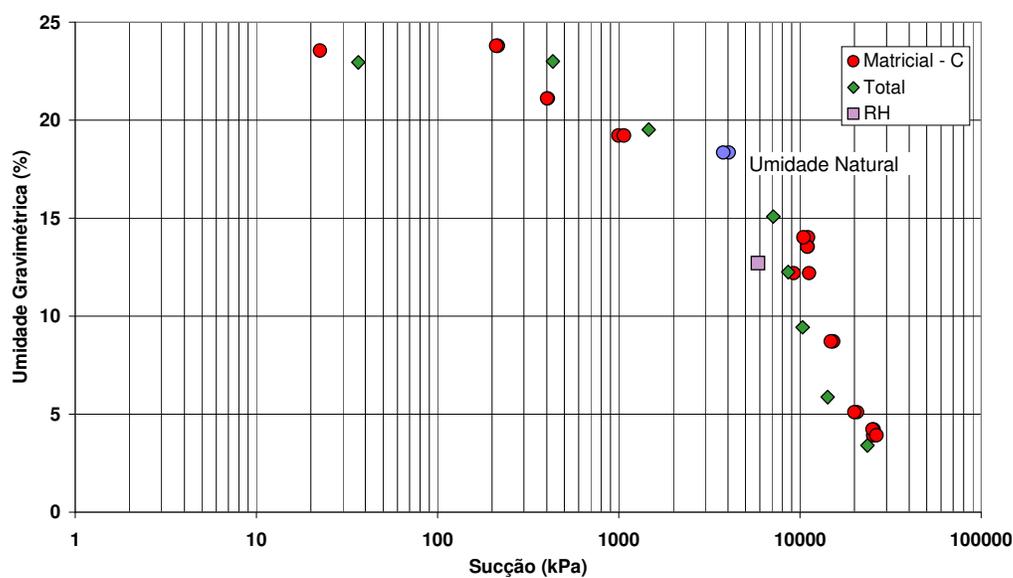


Figura 6.11 – Curva característica de sucção – Solo B1.

Tabela 6.7 – Dados Experimentais Bloco 2 – Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			kPa	kPa		
2,64	3,96	8,67	25889,84	26739,55	0,840	1,495
3,20	4,67	9,97	25555,16	-	0,882	1,456
3,84	5,66	12,22	23398,99	-	0,863	1,474
4,45	6,56	14,11	13955,61	16758,54	0,867	1,473
4,62	6,52	13,39	17043,53	17763,64	0,949	1,412
4,96	7,05	14,60	16413,01	15392,48	0,935	1,422
7,74	11,45	24,71	3346,78	(1)	0,861	1,475
7,89	12,45	29,24	10418,01	9904,84	0,742	1,579
8,02	12,02	26,39	10850,25	10033,93	0,836	1,498
8,47	12,35	26,28	24221,56	25720,97	0,886	1,459
10,16	14,98	32,26	23856,54	23099,66	0,867	1,474
10,36	15,98	36,37	1830,65	1746,01	0,784	1,542
10,40	15,54	34,02	7702,66	7628,96	0,841	1,495
10,85	15,96	34,29	3349,64	2230,53	0,871	1,470
12,95	18,44	38,23	2560,87	2937,41	0,932	1,424
15,04	22,73	50,42	1291,28	1101,21	0,821	1,511
17,33	24,50	50,39	198,51	244,83	0,946	1,414
18,32	28,50	65,60	237,07	(2)	0,768	1,556
19,99	29,63	64,25	529,67	439,76	0,856	1,482
21,29	29,44	59,17	47,77	44,34	0,990	1,382
22,13	31,94	67,20	26,03	27,99	0,906	1,444
23,47	34,02	71,90	28,62	(3)	0,898	1,449
24,31	37,35	84,58	19,99	15,91	0,791	1,536
28,49	43,02	95,39	5,19	(3)	0,822	1,510

(1) Determinação por Umidade Relativa, (2) Determinação em Placa de Pressão,

(3) Determinação em Placa de Sucção.

Tabela 6.8 – Dados Experimentais Bloco 2 – Sucção Total

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Total (kPa)	e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
3,25	4,75	10,13	24423,79	0,882	1,459
3,87	5,71	12,33	24059,79	0,863	1,474
4,71	7,21	16,28	17194,27	0,795	1,530
5,11	7,27	15,08	16608,32	0,930	1,423
7,07	10,59	23,33	10896,97	0,832	1,499
7,89	12,47	29,36	10490,91	0,738	1,580
12,89	18,37	38,17	2574,43	0,928	1,425
15,26	23,07	51,32	1304,17	0,816	1,512
18,35	28,57	65,95	205,57	0,764	1,556
19,92	29,55	64,24	535,57	0,852	1,483
23,52	34,10	72,26	28,67	0,894	1,450
24,43	37,55	85,28	19,94	0,787	1,537
28,54	42,43	92,53	4,98	0,847	1,487

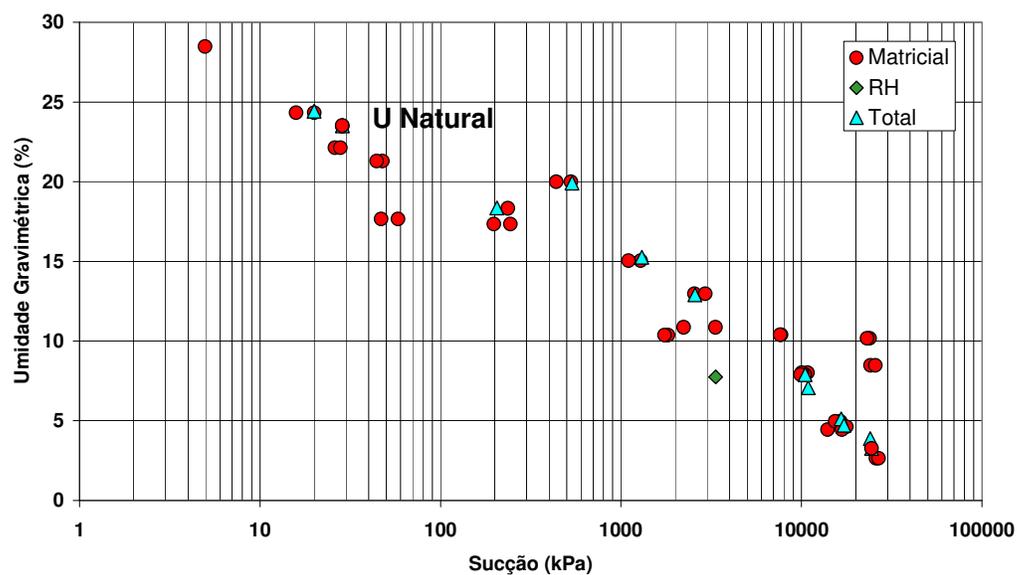


Figura 6.12 – Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B2

Tabela 6.9 – Dados Experimentais B3 – Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			kPa	kPa		
3,77	6,02	14,52	23232,71	-	0,709	1,596
4,19	5,93	12,33	19715,06	-	0,926	1,415
8,87	13,42	30,42	12723,06	-	0,798	1,513
10,38	15,24	32,83	3534,57	-	0,867	1,458
10,45	15,24	32,83	2497,17	2450,36	0,867	1,458
11,68	17,13	37,09	1245,15	-	0,858	1,467
12,37	18,49	40,96	627,60	-	0,823	1,495
12,52	19,16	43,79	638,20	685,52	0,778	1,531
13,07	19,58	43,46	1395,62	-	0,820	1,498
14,11	21,41	48,38	1370,11	1532,65	0,794	1,517
14,18	20,56	44,02	163,96	(1)	0,877	1,450
14,93	22,55	50,71	1789,20	747,41	0,801	1,511
16,39	23,56	49,85	358,95	-	0,896	1,438
17,93	26,61	58,42	491,06	-	0,837	1,484
20,13	30,28	67,56	58,74	(2)	0,812	1,504
22,20	33,11	73,12	9,77	-	0,828	1,492
23,43	35,35	79,16	6,49	(2)	0,807	1,509
24,85	37,35	83,27	6,84	-	0,813	1,503
24,90	36,87	80,70	19,63	-	0,841	1,481
28,36	39,29	79,90	6,61	-	0,968	1,385

(1) Determinação em Placa de Pressão, (2) Determinação em Placa de Sucção.

Tabela 6.10 – Dados Experimentais B3 – Sucção Total

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Total kPa	e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
3,77	6,02	14,52	23497,76	0,709	1,596
4,19	5,93	12,33	21442,95	0,926	1,415
8,87	13,42	30,24	11607,80	0,798	1,513
10,45	15,24	32,83	3534,57	0,867	1,458
11,68	17,13	37,09	1747,10	0,858	1,467
12,37	18,49	40,96	627,60	0,823	1,495
13,07	19,58	43,46	1744,87	0,820	1,498
16,39	23,56	49,85	413,33	0,896	1,438
17,76	24,56	49,93	164,82	0,968	1,383
17,93	26,61	58,42	514,64	0,837	1,484
20,13	30,28	67,56	41,58	0,812	1,504
22,20	33,11	73,12	7,67	0,828	1,492
23,43	35,35	79,16	6,60	0,807	1,509
24,85	37,35	83,27	6,87	0,813	1,503
24,90	36,87	80,70	10,68	0,841	1,481
28,36	39,29	79,90	5,62	0,968	1,385

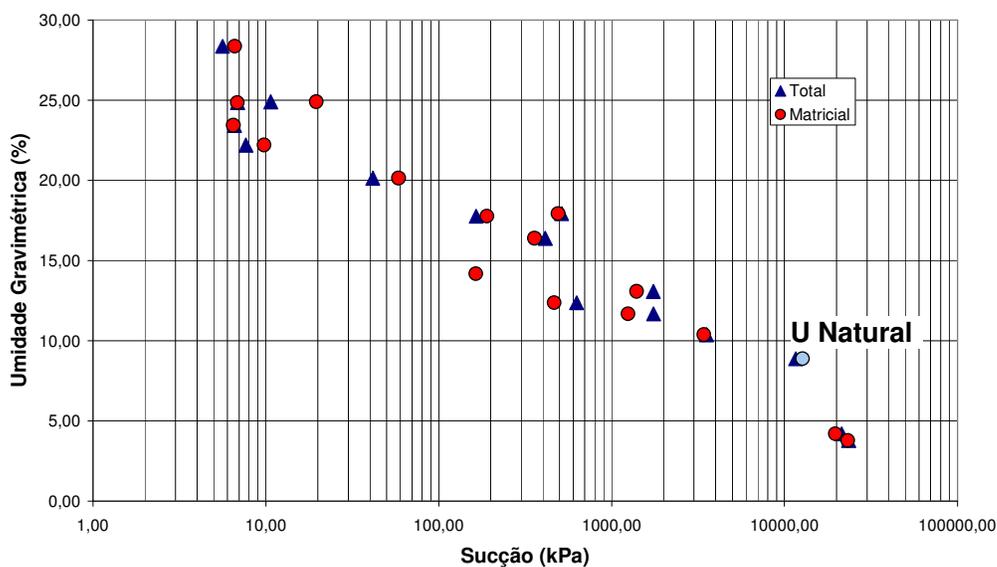


Figura 6.13 – Curva característica de sucção – Perfil SG – Solo B3

Neste material a relação entre a umidade gravimétrica e o grau de saturação apresentou um coeficiente  $R^2 < 0,98$ , como está mostrado na Figura

6.14. Pelo que também é apresentada a relação Sucção vs Grau de Saturação, na Figura 6.15.

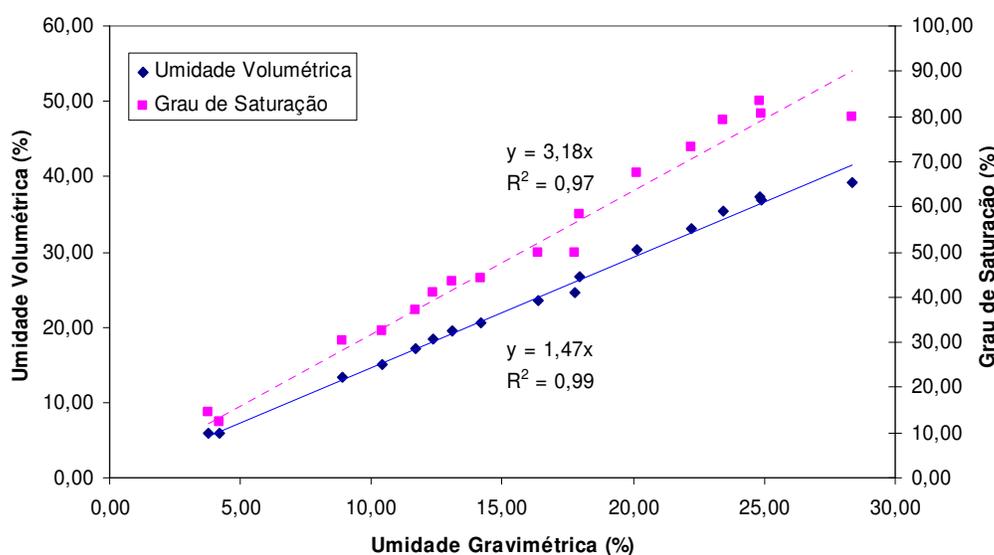


Figura 6.14 – Relação entre o teor de umidade gravimétrico e o grau de saturação para o solo B3.

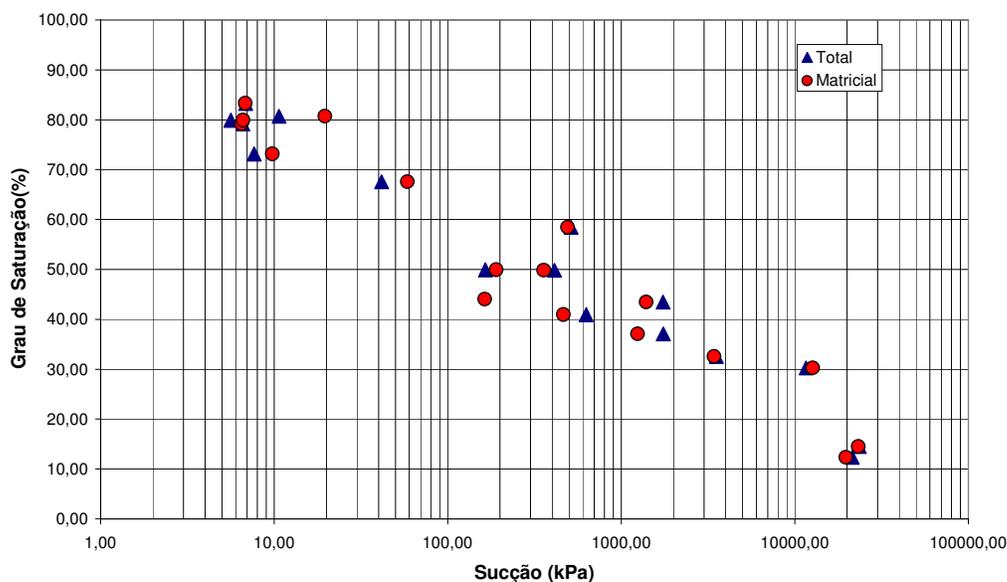


Figura 6.15 – Curva Característica de Sucção – Solo B3

A representação dos valores de grau de saturação em função da sucção (Figura 6.15), no solo B3, apresenta basicamente a mesma forma que no caso da representação da umidade gravimétrica, melhorando somente a definição da porção inicial da curva.

Gráficos auxiliares foram traçados, não apresentados na presente tese, para a determinação dos parâmetros correspondentes com as curvas de cada material. Para a determinação dos parâmetros utilizou-se o método das tangentes (Fredlund e Xing, 1994). Na Tabela 6.11 estão apresentados estes valores, nos casos de curva bimodal são informados os parâmetros correspondentes com cada uma das curvas. Sendo que o sub-índice 1 representa os valores correspondentes com a primeira curva e, o 2 os correspondentes com a segunda curva.

Tabela 6.11 – Parâmetros da Curva Característica – Perfil SG

Material	$\Psi_{ar_1}$ (kPa)	$ws_1$ (%)	$\Psi_{res_1}$ (kPa)	$wres_1$ (%)	$\Psi_{ar_2}$ (kPa)	$ws_2$ (%)	$\Psi_{res_2}$ (kPa)	$Wres_2$ (%)
B0	2000	25	26143,36	3,63	-	-	-	-
B1	300	25	1000	19,20	5000	19,20	26466,55	3,92
B2	11	29	68	18	800	18	26739,55	2,64
B3	32	25	170	15	6000	15	23490,00	3,77

$\Psi_{ar}$ : valor de entrada de ar,  $ws$ : umidade gravimétrica de saturação,  $\Psi_{res}$ : valor de sucção residual,  $wres$ : umidade gravimétrica residual.

O valor de  $\Psi_{res}$  informado corresponde com o máximo valor de sucção registrado nos ensaios. Este ponto é o correspondente com o teor de umidade higroscópica do material (ver item 6.3.1.1) e é considerado igual ao valor de umidade residual do solo. Os valores máximos de sucção determinados estão dentro da faixa de medição do método de papel filtro (item 6.3.1.1).

Não existe uma relação direta entre os parâmetros obtidos e o tipo de solo. Nos solos que apresentaram curvas bimodais, pode observar-se que o valor de entrada de ar (da primeira curva) diminuiu muito nos solos considerados mais jovens (segundo o valor de LOI determinado no Capítulo 2) em comparação com o Solo B1. Analisando do ponto de vista capilar, unicamente, isto indica a presença de poros maiores nos solos B2 e B3, em comparação com os do solo B1.

Embora a curva de distribuição de poros determinada pelos ensaios de porosimetria (Figura 2.26) apresente a presença de três tamanhos de poros principais, as curvas características determinadas apresentaram uma distribuição bimodal. A diferença de distribuição de poros determinada pela porosimetria e pela curva característica de sucção será discutida no item 6.4 da presente. Da Figura 2.26 pode observar-se que o valor intermediário de poros é

realmente importante para o Solo B3, sendo um pico pouco expressivo (em comparação com os outros dois) para os solos B0, B1 e B2. Os dados de ensaio do Solo B3 não permitem observar uma forma bem definida, ficando a definição de uma curva bimodal mais definida na representação em função do grau de saturação. Uma das razões para esta forma é que o material apresenta uma heterogeneidade grande, o que pode ser observado pela variação do índice de vazios com a sucção. Na Figura 6.16 está apresentada esta variação para os diferentes materiais.

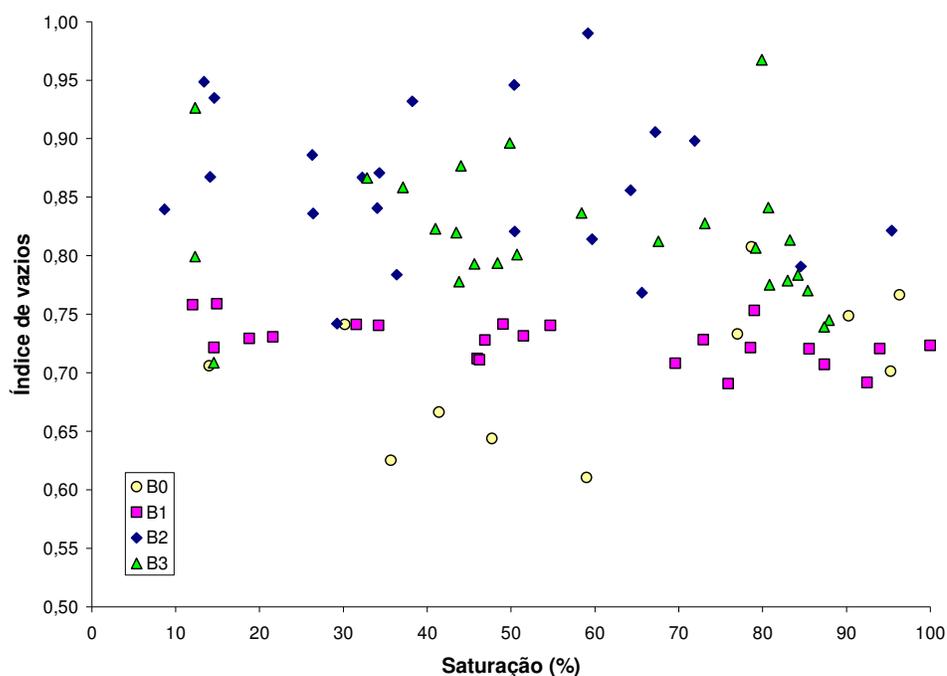


Figura 6.16 – Variação do Índice de Vazios com o Grau de Saturação para os solos do perfil SG.

Da Figura 6.16 pode-se observar que a variação do índice de vazios do solo B3 é importante e muito maior que a do solo B1. O solo B2 apresenta um comportamento similar, embora menos acentuado. O solo B0 também apresenta uma variação importante, mas a forma da curva característica deste solo é aparentemente só função do conteúdo de finos deste material (>60%). A variação do índice de vazios dos corpos de provas é consequência da heterogeneidade do material, e ela é inversamente proporcional à idade (do ponto de vista do intemperismo medido pelo parâmetro LOI) do solo. Já que como foi comentado no início deste item, os corpos de provas não apresentaram



comportamento está na parte central (100-1000kPa), na parte final as curvas são coincidentes. Esta diferença de comportamento na parte central pode ser função do pico intermediário presente nos ensaios de porosimetria (Figura 2.26), muito mais importante para o solo B3 que para o solo B2. Os valores de granulometria,  $G_s$  e índice de vazios (Tabela 2.16) dos dois materiais são muito similares, mas a forma apresentada pelas curvas é diferente. De maneira inversa ao que acontece com os solos B1 e B0.

Os valores de perda ao fogo (Tabelas 2.17 e 2.18) e as lâminas petrográficas mostram que o solo B3 é ainda muito influenciado pelas características da rocha de origem, o que justifica a grande variabilidade do índice de vazios e a forma pouco definida da curva experimental.

Todos os solos registraram valores máximos de sucção (e de umidade higroscópica) similares, o que indica que este parâmetro está determinado, principalmente, pelo argilomineral presente. No caso do perfil estudado, a caulinita.

As curvas dos materiais não mostraram uma relação direta com as propriedades índices, como mostrado pela comparação entre as diferentes curvas.

Nos solos residuais também foram determinados os valores de sucção total e da análise dos resultados pode afirmar-se que não existe diferença entre os valores de sucção total e matricial para estes solos. Nas Figuras seguintes está mostrada a correspondência entre os dois valores para os solos ensaiados.

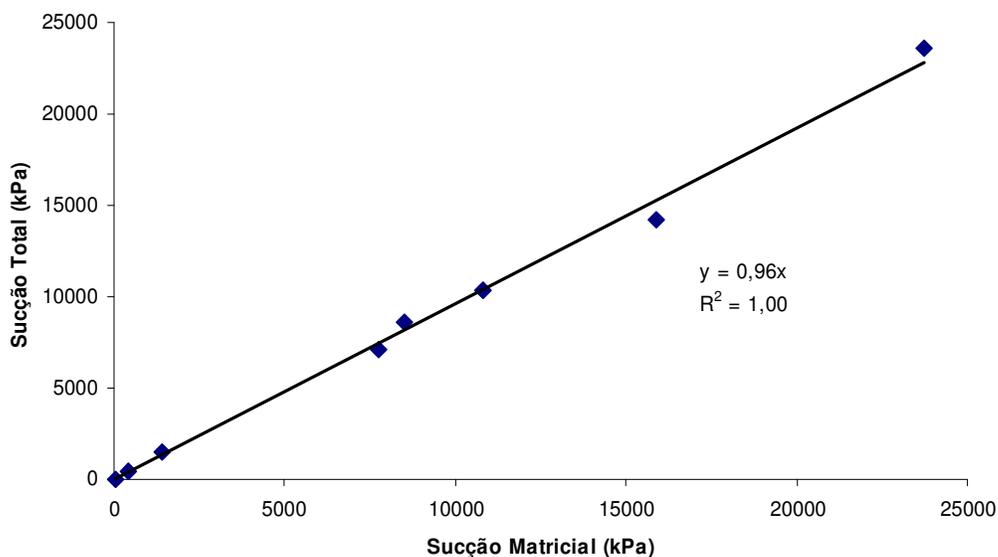


Figura 6.18 – Comparação entre os valores de Sucção Total e de Sucção Matricial para o solo B1.

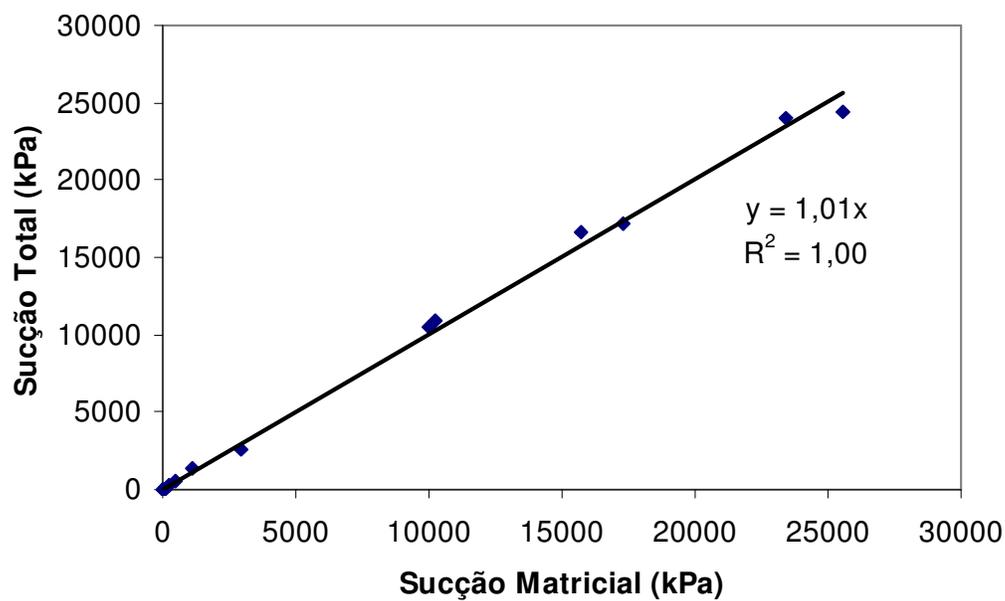


Figura 6.19 – Comparação entre os valores de Sucção Total e de Sucção Matricial para o solo B2.

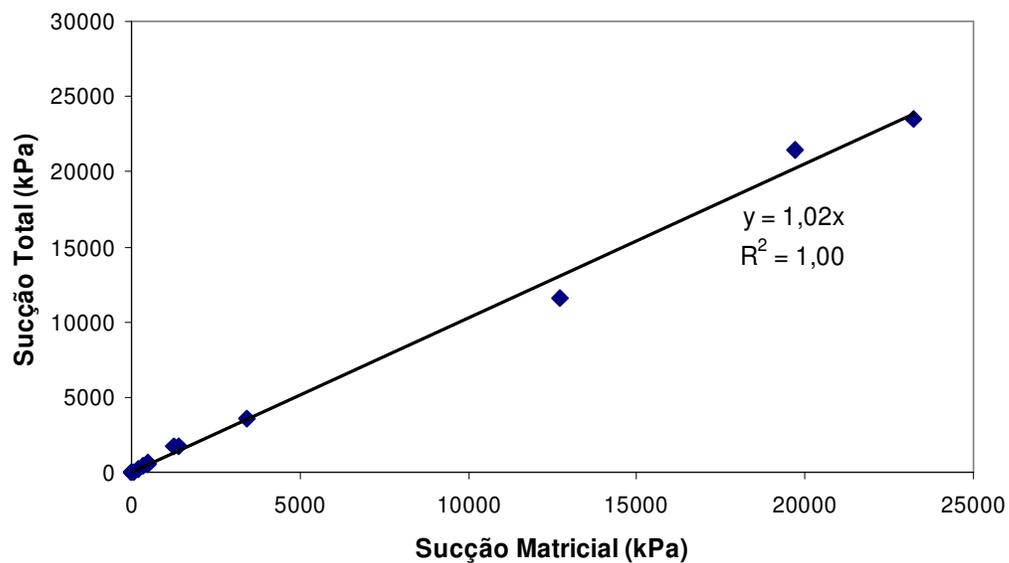


Figura 6.20 – Comparação entre os valores de Sucção Total e de Sucção Matricial para o solo B3.

### 6.3.2.2

#### Outros materiais

Serão apresentados a seguir os valores correspondentes com os solos residuais de sienito e de filito, e os solos sedimentares (colúvio e sedimentar). Nestes solos não foi observada variação de volume como consequência dos procedimentos de umedecimento e/ou secagem utilizados na preparação das amostras e da execução do ensaio de determinação de curva característica de sucção.

De maneira semelhante ao apresentado no item 6.3.2.1, as Tabelas informam os valores obtidos pelas diferentes técnicas, além dos valores dos parâmetros físicos correspondentes com cada anel de solo. Nas Figuras estão apresentados os teores de umidade gravimétrica em função do valor de sucção. As representações usando teores de umidade volumétrica e grau de saturação só foram utilizadas quando a relação linear entre a umidade gravimétrica e a volumétrica e/ou grau de saturação apresentou valores de  $R^2 < 0,98$ . Valores menores que 0,98 indicam variações importantes no índice de vazios.

Tabela 6.12 – Dados Experimentais Solo Residual de Sienito – Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			kPa	KPa		
3,38	3,91	6,99	24992,50	25949,36	1,269	1,158
8,14	8,99	15,52	8890,25	10358,36	1,377	1,105
11,21	12,62	22,09	5468,14	6030,26	1,333	1,126
12,26	13,81	24,17	5722,07	5792,59	1,333	1,126
13,17	15,05	26,64	5774,69	5099,16	1,299	1,143
14,78	17,22	30,95	4084,59	3517,43	1,255	1,165
15,18	17,68	31,78	4000,04	3519,15	1,255	1,165
20,72	24,15	43,39	2976,70	3145,40	1,255	1,165
26,16	30,01	53,28	2197,60	1640,76	1,290	1,147
31,24	36,40	65,42	1147,77	1179,42	1,255	1,165
33,73	37,26	64,30	1287,81	1361,99	1,378	1,105
35,63	40,30	70,76	1134,61	1276,84	1,323	1,131
41,04	47,82	85,94	647,52	534,56	1,255	1,165
46,96	51,74	89,11	576,09	731,19	1,384	1,102
46,17	53,80	91,61	28,70	(1)	1,320	1,162

(1) Determinação por Placa de Sucção

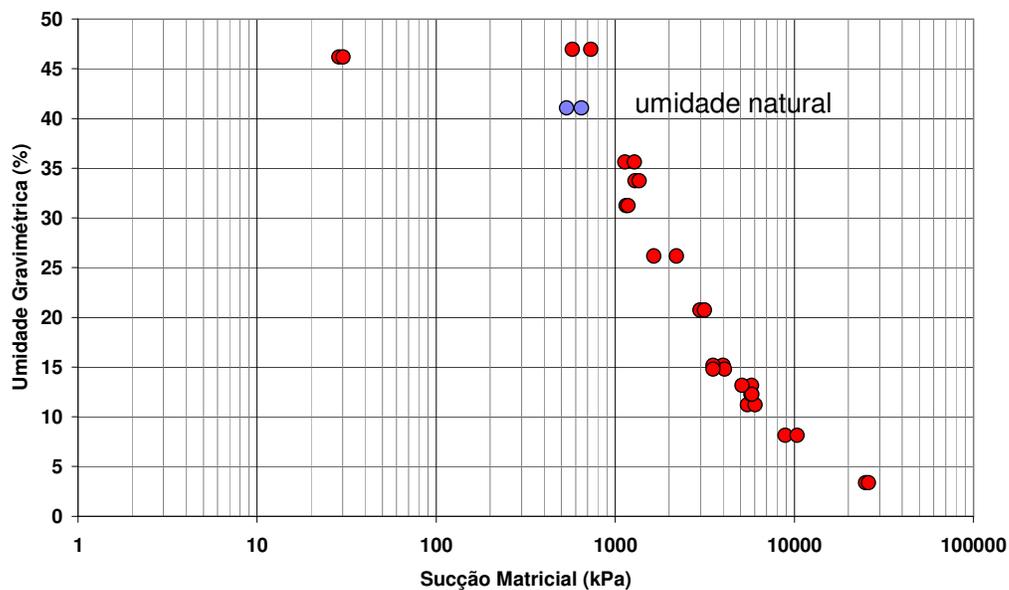


Figura 6.21 – Curva característica de sucção – Solo Residual de Sienito

Tabela 6.13 – Dados Experimentais Solo Residual de Filito – Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)	e	$\rho_d$ cm <sup>3</sup> /s	
5,62	6,73	12,09	1826,61	1,254	1,198	
6,48	9,30	19,86	1358,21	0,880	1,436	
8,44	12,72	28,76	1123,84	0,793	1,506	
10,73	15,90	35,27	631,40	0,821	1,482	
12,85	19,60	45,07	337,91	0,770	1,526	
16,17	24,44	55,49	188,55	0,787	1,511	
17,93	25,44	53,59	178,73	0,903	1,419	
21,35	32,87	76,45	49,10	0,754	1,539	
26,20	38,80	85,90	20,69	(1)	0,824	1,481
27,49	41,30	93,14	20,68	(1)	0,797	1,503
27,78	41,83	94,53	13,79	(1)	0,794	1,505
27,88	41,94	94,70	9,66	(1)	0,795	1,504
29,16	43,43	96,87	13,74	0,813	1,489	
29,25	42,75	93,22	24,54	0,847	1,462	
30,08	44,74	99,60	2,40	0,815	1,487	
31,01	45,33	98,83	5,45	0,847	1,462	

(1) Determinação em Placa de Sucção

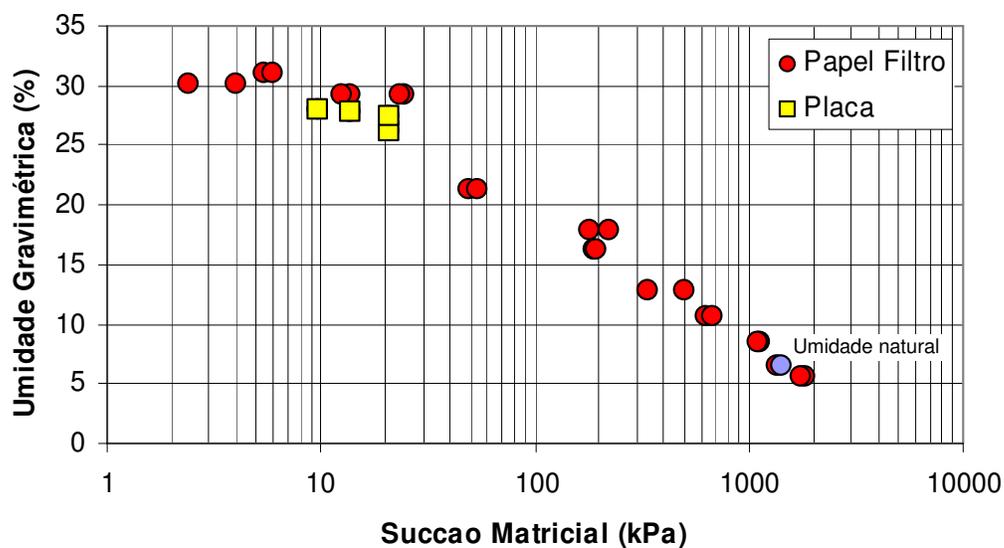


Figura 6.22 – Curva característica de sucção – Solo Residual de Filito

Tabela 6.14 – Dados Experimentais Solo Coluvionar PUC – Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			kPa	kPa		
2,73	3,68	7,51	21749,99	21187,09	0,96	1,35
14,74	20,74	44,22	8711,01	7584,13	0,88	1,41
17,29	23,52	48,36	4614,61	3752,11	0,95	1,36
21,45	32,39	75,32	200,00	(1)	0,75	1,51
21,48	30,21	64,38	1308,27	1334,48	0,88	1,41
21,61	30,97	67,45	31,37	36,82	0,85	1,43
23,02	34,55	79,67	55,16	(1)	0,77	1,50
24,57	34,17	71,91	10,44	11,66	0,91	1,39
28,31	37,48	74,90	5,40	(2)	1,00	1,32

(1) Determinação em Placa de Pressão (2) Determinação em Placa de Sucção,

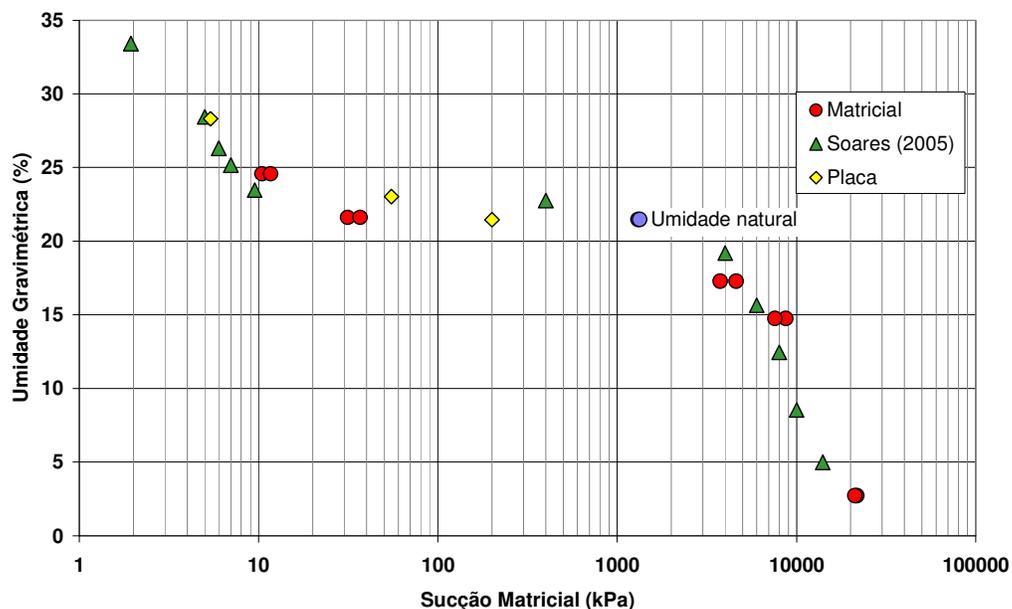


Figura 6.23 – Curva característica de sucção – Solo Coluvionar PUC

Tabela 6.15 – Dados Experimentais Solo Sedimentar Maranhão– Sucção Matricial - C

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial kPa	e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
0,45	0,85	2,85	11350,36	0,421	1,88
0,53	1,00	3,49	13254,76	0,395	1,90
0,63	1,17	3,82	9483,51	0,441	1,85
1,12	2,12	7,26	7922,87	0,415	1,89
2,44	4,51	14,75	4035,74	0,443	1,85
3,06	5,61	17,95	2976,18	0,461	1,84
3,86	7,09	22,66	830,59	0,464	1,84
3,86	7,15	23,35	1150,08	0,441	1,85
3,86	7,16	23,38	3168,63	0,441	1,85
4,24	7,77	24,86	1768,26	0,462	1,84
5,00	9,51	33,10	58,92	0,400	1,90
5,00	9,51	33,10	125,36	0,404	2,02
5,64	10,70	36,92	48,26 (1)	0,421	1,89
5,73	10,88	37,54	20,68 (1)	0,426	1,90
7,16	12,63	37,18	18,05	0,511	1,76
8,72	16,30	54,33	10,10	0,432	1,87
9,61	18,02	60,51	9,60	0,421	1,87
10,86	20,59	71,05	7,82	0,411	1,90
11,71	22,20	76,61	6,89 (1)	0,424	1,90
11,88	22,60	78,65	7,12	0,404	1,90
12,02	22,28	72,81	7,01	0,444	1,85
13,38	25,42	88,16	6,37	0,416	1,90

(1) Determinação na Placa de Pressão

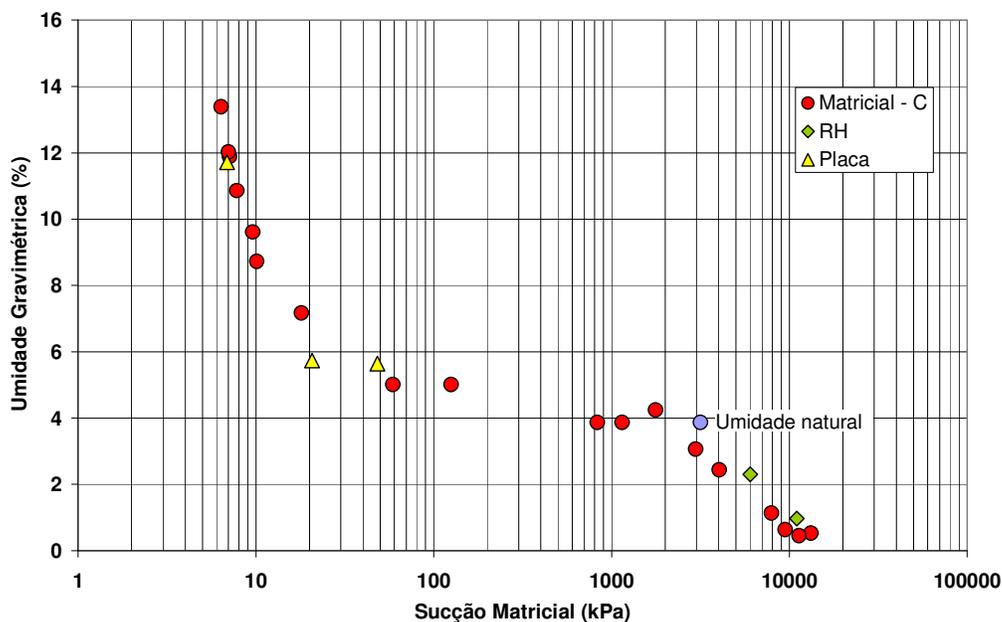


Figura 6.24 – Curva característica de sucção – Solo Sedimentar Maranhão

O solo residual de Filito (Tabela 6.13 e Figura 6.22) apresentou uma umidade higroscópica (gravimétrica) de 0,73%. A umidade do papel filtro correspondente foi menor que 6,35%, ou seja, o papel seguiu uma trajetória de secagem. Como a calibração disponível é de trajetória de umedecimento, o ponto correspondente ao teor de umidade higroscópica foi desconsiderado.

Na Tabela 6.16 são resumidos os dados obtidos para as curvas características dos diferentes materiais.

Tabela 6.16 – Parâmetros das Curvas Características

Solo	$\Psi_{ar_1}$ (kPa)	$ws_1$ (%)	$\Psi_{res_1}$ (kPa)	$wres_1$ (%)	$\Psi_{ar_2}$ (kPa)	$ws_2$ (%)	$\Psi_{res_2}$ (kPa)	$wres_2$ (%)
Residual de Sienito	500	47,00	25949,36	3,38	-	-	-	-
Residual de Filito	12	31,00	3000	2,00	-	-	-	-
Coluvionar	3	33,50	11	23,00	3000	23,00	21749,99	2,73
Sedimentar do Maranhão	6	14,00	20	5,73	3000	5,73	13254,76	0,53

$\Psi_{ar}$ : valor de entrada de ar,  $ws$ : umidade gravimétrica de saturação,  $\Psi_{res}$ : valor de sucção residual,  $wres$ : umidade gravimétrica residual.

A comparação entre os valores de entrada de ar dos solos coluvionar e sedimentar, mostra que mesmo com características físicas diferentes (Tabela

6.2), eles ficaram muito próximos, as diferenças ficam por conta das umidades de saturação e residuais. Os dois materiais apresentaram curvas bimodais.

A Figura 6.25 mostra uma comparação entre os dois solos residuais. Ambos apresentaram curvas únicas, e a variação da sucção com a umidade é muito mais acentuada para o solo de Sienito. As características físicas destes solos mostram que o solo de alteração de Sienito possui materiais mais ativos (valor de  $w_L$  e  $w_P$ ). Comparando as curvas, pode-se observar que para um mesmo valor de saturação as sucções são maiores para o solo de Sienito, do ponto de vista capilar, isto significa a presença de poros menores.

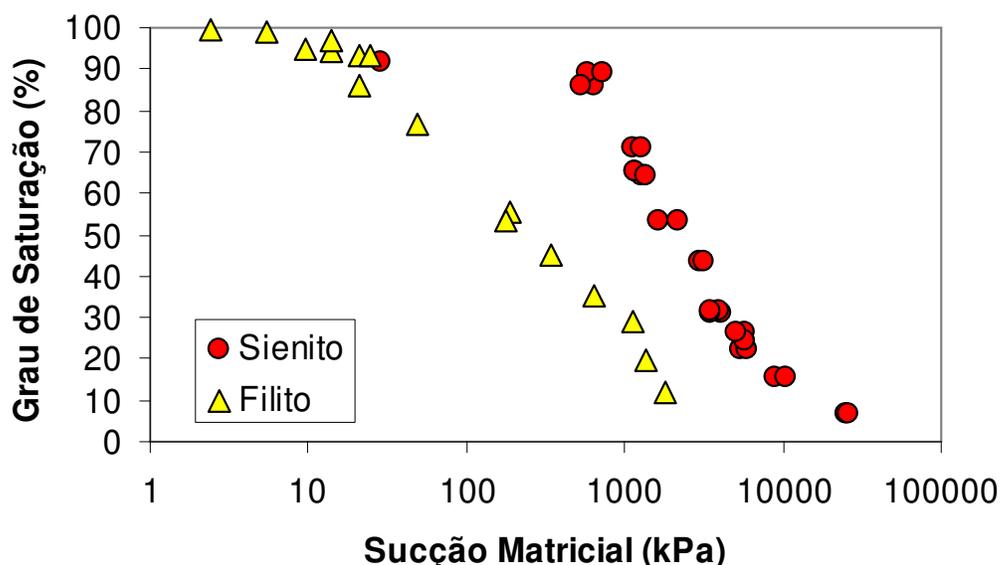


Figura 6.25 – Comparação entre as curvas características dos solos residuais de Sienito e Filito.

Das diferentes curvas obtidas pode-se observar que a combinação das diferentes técnicas foi satisfatória na obtenção de uma curva única, não sendo observadas diferenças importantes. O Método do Papel Filtro teve uma resposta satisfatória para todos os materiais, desde que utilizado na trajetória de umedecimento. A utilização de um número grande de corpos de prova permite considerar, indiretamente, a heterogeneidade do material na curva de retenção.

O comportamento dos solos residuais é diferente, dependendo da rocha de origem. Os solos residuais de Gnaiss apresentaram curvas bimodais enquanto os solos residuais de Sienito e Filito apresentaram curvas únicas. A existência de patamares nas curvas de retenção não é exclusividade dos solos residuais, os dois solos sedimentares apresentaram curvas bimodais.

### 6.3.2.3

#### Histerese

Nos materiais B1 e B3 do perfil de alteração de Gnaisse trabalhou-se com trajetórias de umedecimento ou secagem, além da trajetória a partir da umidade natural (item 6.3.2.1), para avaliar a existência ou não de histerese.

Nas trajetórias de umedecimento os anéis de material secaram ao ar até atingir a condição de massa constante. A partir desse conteúdo de umidade foram adicionados diferentes conteúdos de água para cobrir a faixa de variação da sucção. Nas trajetórias de secagem os anéis foram saturados. A partir da saturação foram deixados secar ao ar até atingir o valor de umidade desejado. Também aqui não foram observadas mudanças de volume como consequência da preparação das amostras ou durante a execução do ensaio. Para a determinação da sucção correspondente com cada conteúdo de água foi utilizado o Método do Papel Filtro.

A seguir são apresentados os resultados obtidos. Nas Figuras, a legenda Matricial-C identifica a trajetória a partir da umidade natural, a legenda Matricial-U a trajetória de umedecimento e a legenda Matricial-S a trajetória de secagem. No caso do solo B3 optou-se pela representação em função do grau de saturação pelas mesmas considerações citadas no item 6.3.2.1.

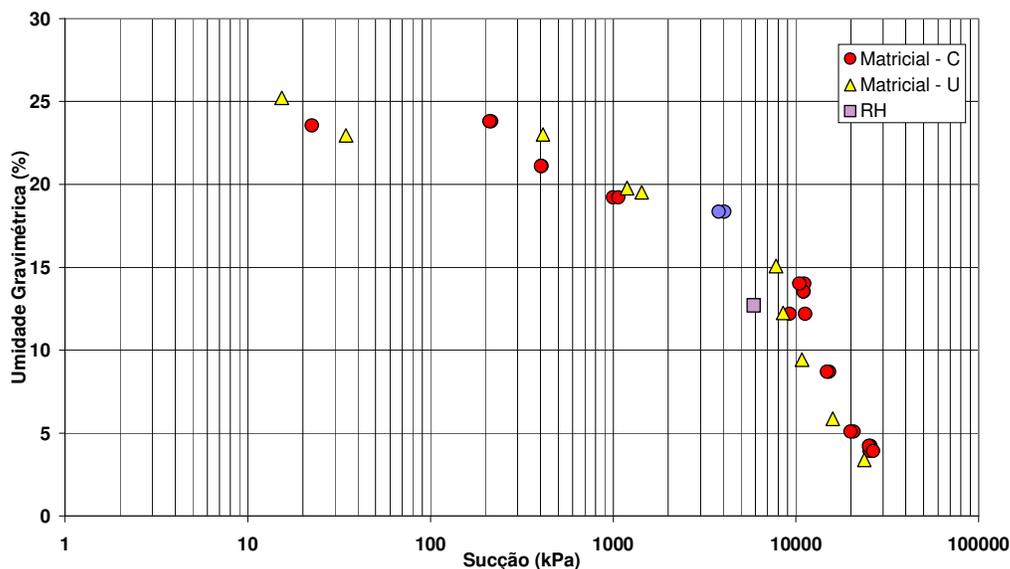


Figura 6.26 – Diferentes trajetórias para o Solo B1

Tabela 6.17 – Dados Experimentais – Trajetória de umedecimento – Solo B1

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)	e	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
3,39	5,19	12,03	23709,58	0,758	1,528
5,87	9,11	21,57	15901,67	0,731	1,552
9,43	14,55	34,20	10793,70	0,740	1,543
12,25	19,23	46,26	8512,55	0,711	1,570
15,08	23,27	54,68	7772,16	0,741	1,543
19,52	31,01	75,90	1431,07	0,691	1,589
19,78	30,74	72,96	1190,63	0,728	1,554
22,95	35,83	85,56	34,49	0,720	1,561
23,00	36,19	87,37	413,00	0,707	1,573
25,22	39,36	93,98	15,32	0,721	1,561

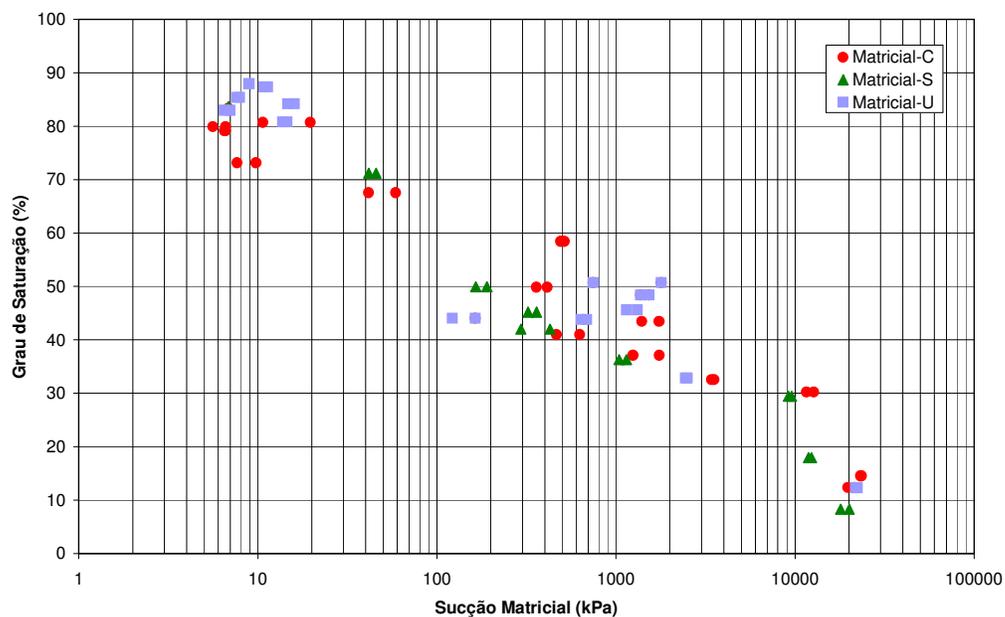


Figura 6.27 – Diferentes trajetórias para o Solo B3

Tabela 6.18 - -- Dados Experimentais – Trajetória de secagem – Solo B3

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial		e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			(kPa)	(kPa)		
2,55	3,78	8,29	20037,85	17968,91	0,837	1,481
5,12	7,85	17,95	12346,62	11892,27	0,777	1,531
8,19	12,68	29,44	9556,68	9191,94	0,757	1,549
11,64	18,05	42,00	294,23	428,71	0,754	1,551
12,34	17,44	36,30	1040,09	1142,65	0,925	1,414
15,53	21,84	45,21	323,10	359,63	0,935	1,407
17,76	24,56	49,93	164,82	190,28	0,968	1,383
21,15	29,40	71,19	41,58	45,74	0,810	1,390
24,95	34,68	83,61	6,87	6,84	0,813	1,390

Tabela 6.19 - -- Dados Experimentais – Trajetória de umedecimento – Solo B3

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção	Sucção	e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>
			Base (kPa)	Topo (kPa)		
3,61	5,46	12,30	21756,75	22285,43	0,799	1,512
10,45	15,24	32,83	2497,17	2450,36	0,867	1,458
12,52	19,16	43,79	638,20	685,52	0,778	1,531
13,30	20,18	45,62	1316,42	1144,94	0,793	1,518
14,11	21,41	48,38	1370,11	1532,65	0,794	1,517
14,18	20,56	44,02	122,12	163,96	0,877	1,450
14,93	22,55	50,71	1789,20	747,41	0,801	1,511
23,02	35,29	80,81	13,75	14,56	0,775	1,533
23,73	37,12	87,34	10,79	11,36	0,739	1,565
24,07	37,54	87,92	8,92	8,94	0,745	1,559
24,25	37,00	84,21	14,70	16,02	0,784	1,525
24,16	37,14	85,37	7,61	7,90	0,770	1,537
23,75	36,33	82,98	6,47	7,00	0,779	1,530

Das Figuras e das Tabelas pode observar-se que não existe uma diferença importante entre as diferentes trajetórias, no caso do material B1(Figura 6.26) as curvas são quase coincidentes. No solo B3, a diferença de sucção resultante da trajetória escolhida é menor / ou igual à gerada pela própria heterogeneidade do material. Na Figura 6.28 está mostrada a variação do índice de vazios do solo B3, considerando todos os corpos de prova utilizados nos ensaios.

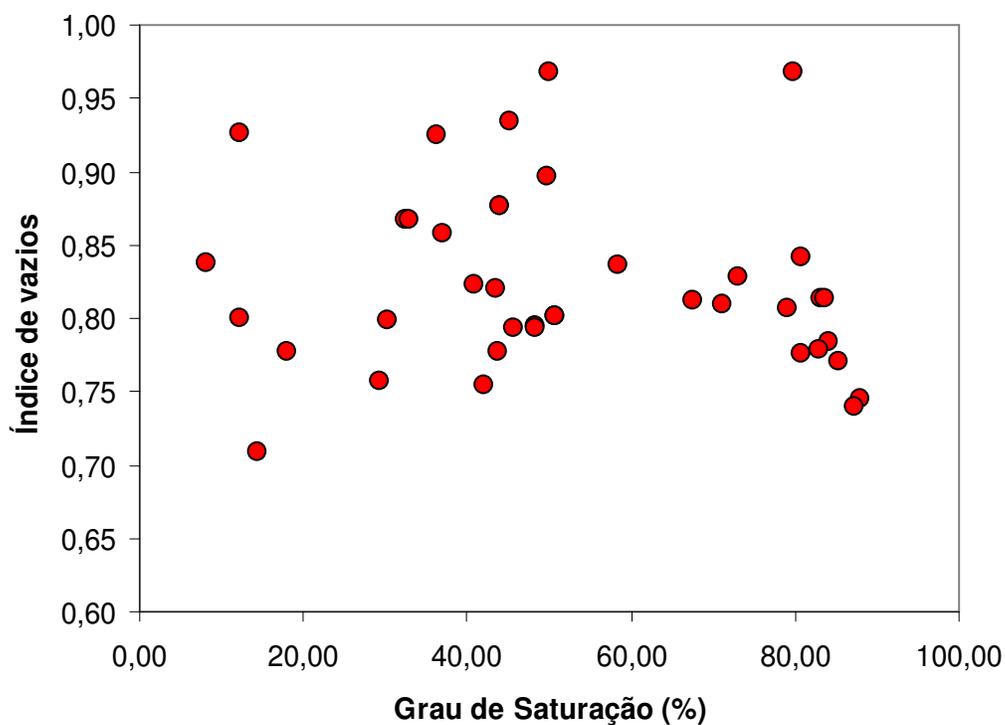


Figura 6.28 – Variação do índice de vazios - Solo B3.

Pode-se observar que a variação de índice de vazios dos corpos de prova do solo B3 é importante, o que dificulta a observação do fenômeno de histerese.

Para reduzir a influência da heterogeneidade, foi testada uma amostra do solo residual B2 e do solo sedimentar do Maranhão na placa de pressão. A pedra utilizada foi de 3Bar, o tempo total de ensaio foi de quase dois meses para o material residual e de um mês e meio para o material sedimentar. Os resultados estão apresentados nas Figuras 6.29 e 6.30.

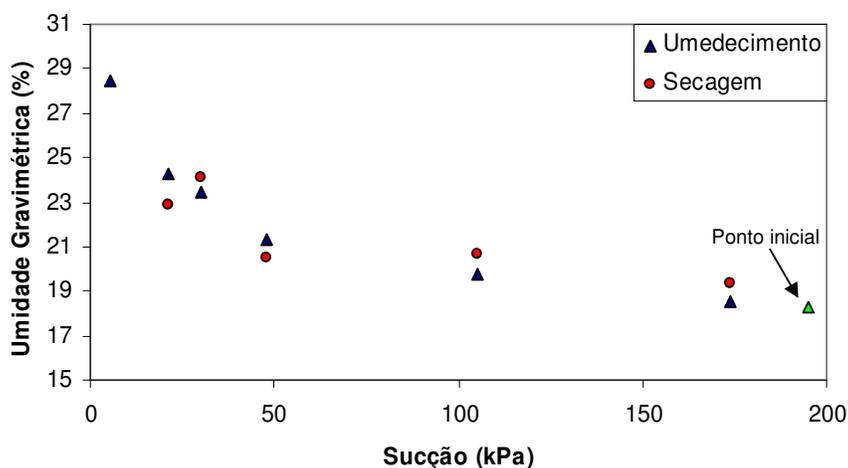


Figura 6.29 – Comportamento do Solo Residual de Gnaiss B2

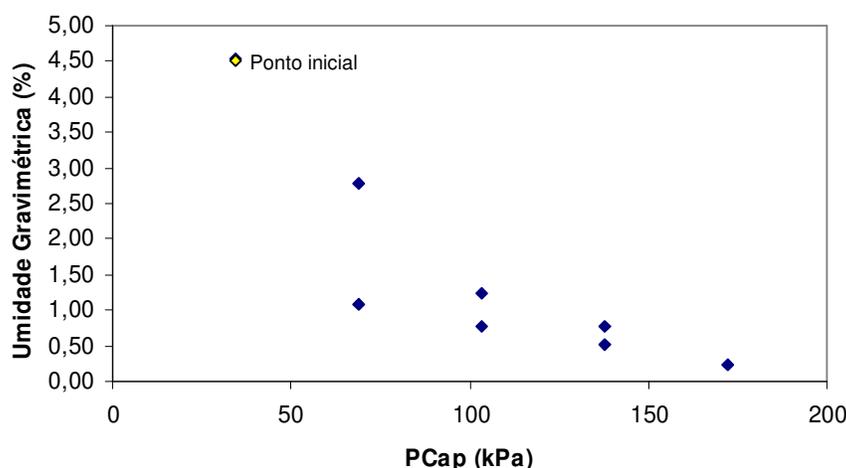


Figura 6.30 – Comportamento do Solo Sedimentar do Maranhão.

No material residual B2 não foi observado o comportamento de histerese, existe uma diferença entre os valores de umidade pelas duas trajetórias, mas a diferença é pequena e pode ser simplesmente consequência da precisão da leitura, já que não apresentou um comportamento definido. Os valores de umidade e sucção achados são consistentes com os informados na Figura 6.12.

No caso do solo sedimentar, observou-se uma clara diferença entre as duas trajetórias, o que evidencia a existência do fenômeno de histerese, mas os valores de umidade e de sucção obtidos não são coerentes com os da curva experimental (Figura 6.24). Não foi encontrada uma explicação para este comportamento.

Os resultados achados não são conclusivos para o material sedimentar do Maranhão. Já para os solos residuais do perfil São Gonçalo, em vista dos resultados apresentados, pode-se supor que o fenômeno de histerese é de importância menor que a heterogeneidade própria do material, mas é necessário executar mais ensaios para confirmar esta hipótese.

### 6.3.3 Porosimetria por injeção de mercúrio

A partir dos resultados dos ensaios de porosimetria de injeção de mercúrio é possível determinar a curva característica de sucção, como foi colocado no Capítulo 5. Os resultados dos ensaios de porosimetria para os materiais do perfil de alteração de Gnaiss (B0 a B4) foram apresentados no Capítulo 2. Para os outros materiais foram executados ensaios de porosimetria e a distribuição de

poros correspondente a cada um deles está apresentada, respectivamente, nas Figuras 6.31 a 6.34.

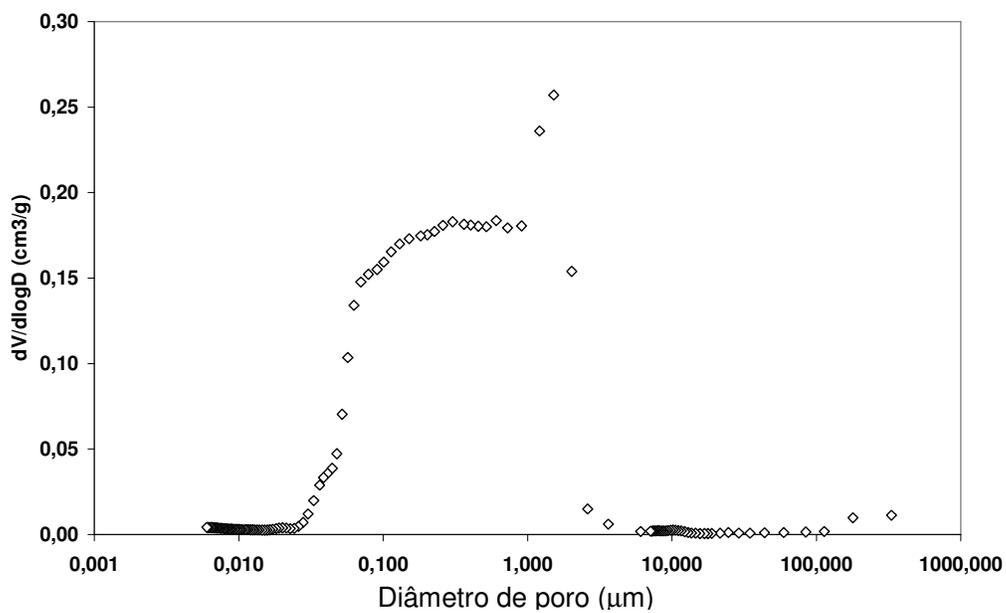


Figura 6.31 - Distribuição de poros Solo Residual de Sienito

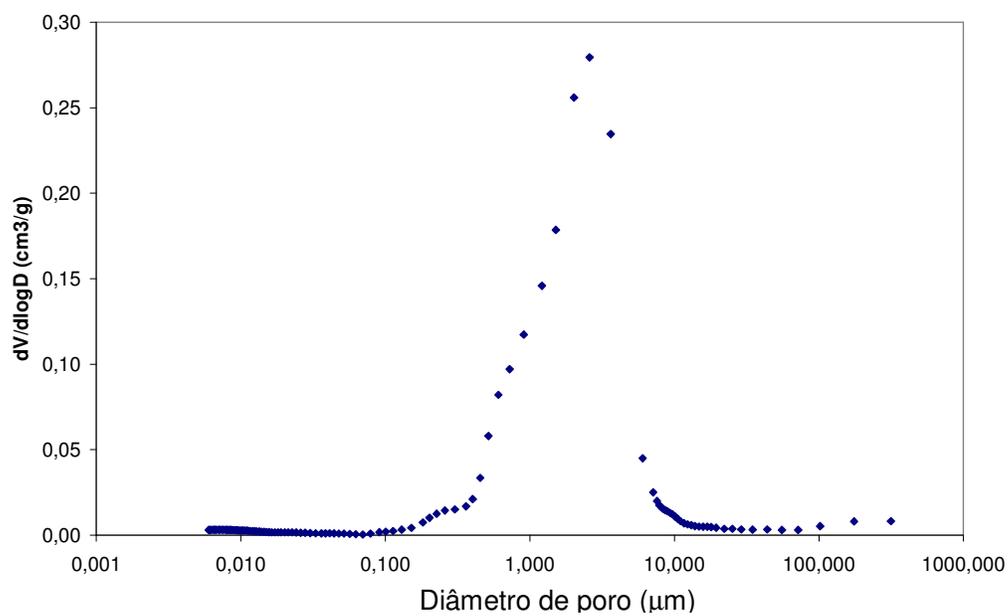


Figura 6.32 - Distribuição de poros - Solo Residual de Filito

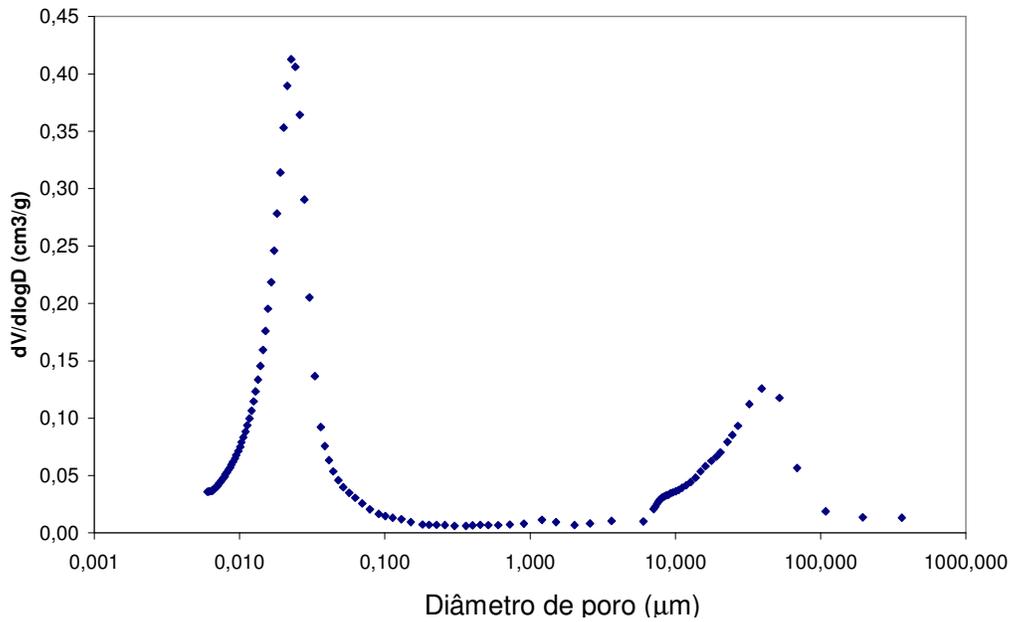


Figura 6.33 – Distribuição de poros - Solo Coluvionar.

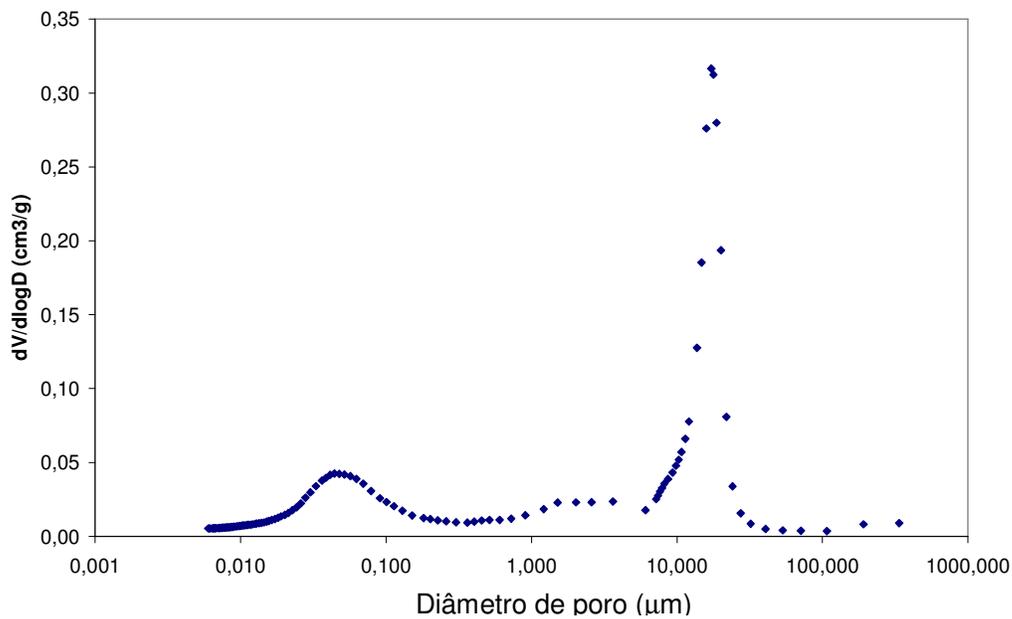


Figura 6.34 – Distribuição de poros - Solo Sedimentar do Maranhão.

No solo sedimentar do Maranhão (Figura 6.34) e no solo coluvionar (Figura 6.33) existem dois picos bem definidos, indicando a ocorrência de uma distribuição de poros bimodal nestes solos. No solo sedimentar o pico mais importante correspondente aos macro-poros, enquanto no solo coluvionar ele corresponde aos micro-poros. No solo residual de Filito (Figura 6.32) tem-se um pico bem definido e, no solo residual de Sienito (Figura 6.31) tem-se um pico

mais disperso (entre 0,1 e 1mm). Pela forma das curvas é de se esperar uma curva bimodal para os solos sedimentar e coluvionar, e unimodal para os solos residuais de Sienito e Filito. Este comportamento está coerente com as curvas de retenção determinadas no item 6.3.2.2.

A partir dos dados dos ensaios, e com as equações apresentadas no Capítulo 5, foram calculadas as curvas características de sucção de cada material. Os resultados estão apresentados nas Figuras 6.35 a 6.42. Encontram-se incluídos, nestas Figuras, os pontos correspondentes aos ensaios executados para a determinação das curvas características apresentados acima.

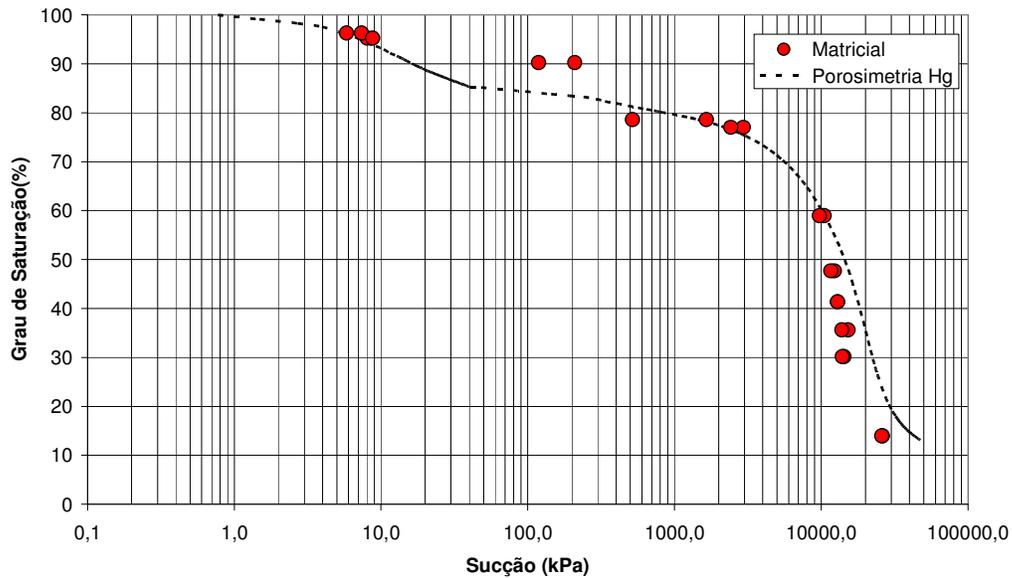


Figura 6.35 – Curva Característica de Sucção por porosimetria Hg – B0.

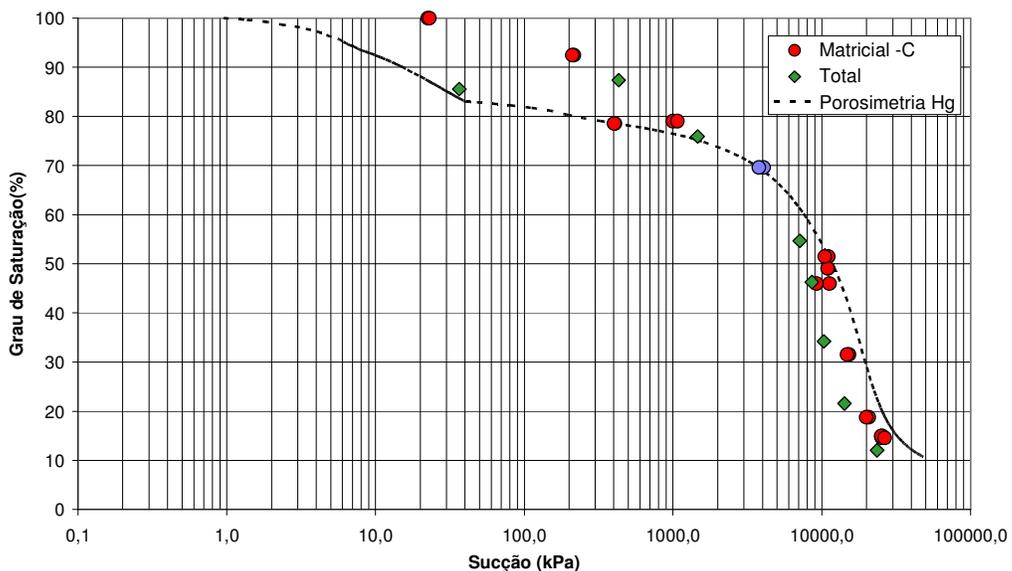


Figura 6.36 – Curva Característica de Sucção por porosimetria Hg – B1

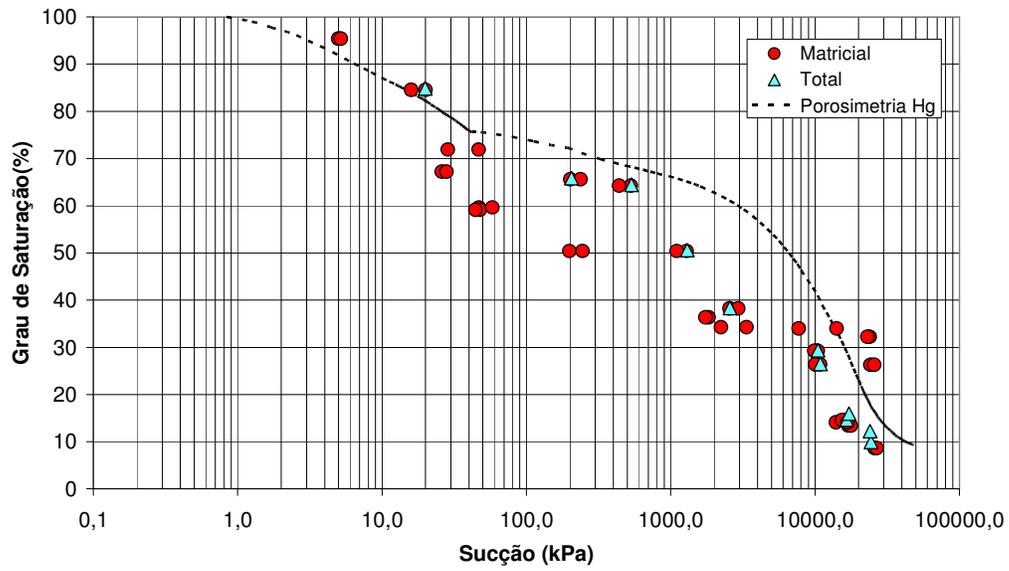


Figura 6.37 – Curva Característica de Sucção por porosimetria Hg – B2

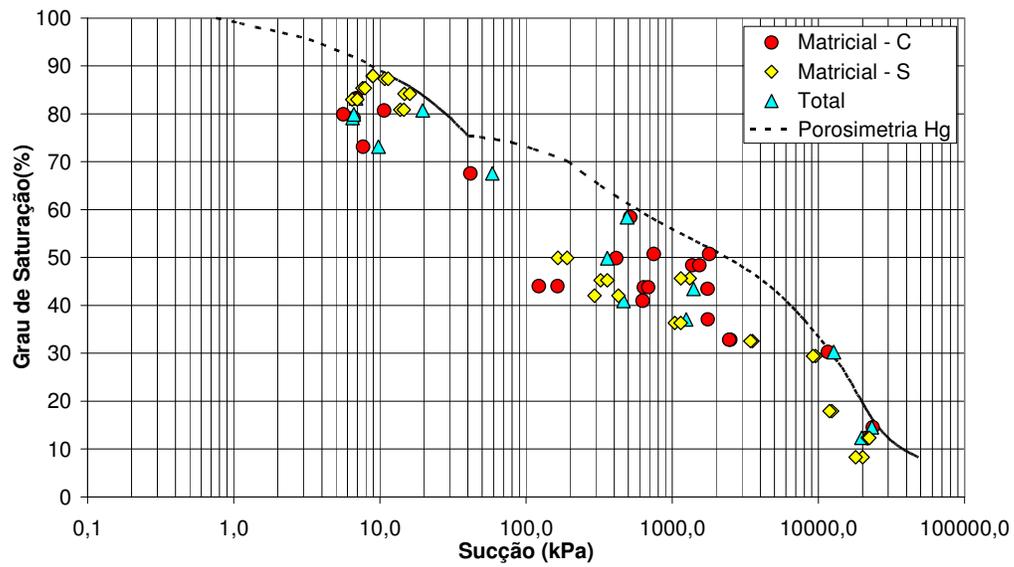


Figura 6.38 – Curva Característica de Sucção por porosimetria Hg – B3

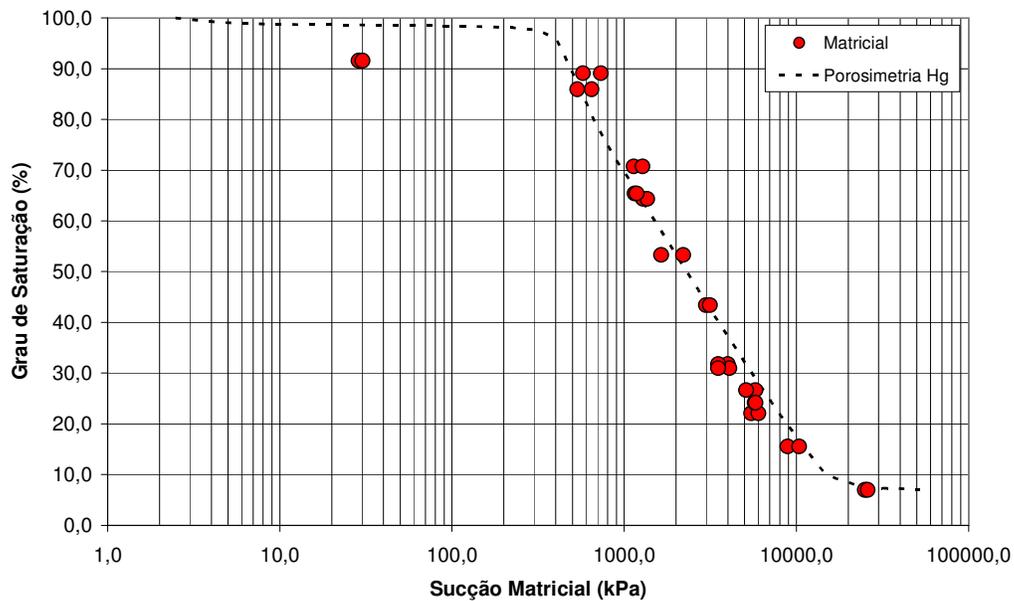


Figura 6.39 – Curva Característica de Sucção por porosimetria – Solo Residual de Sienito.

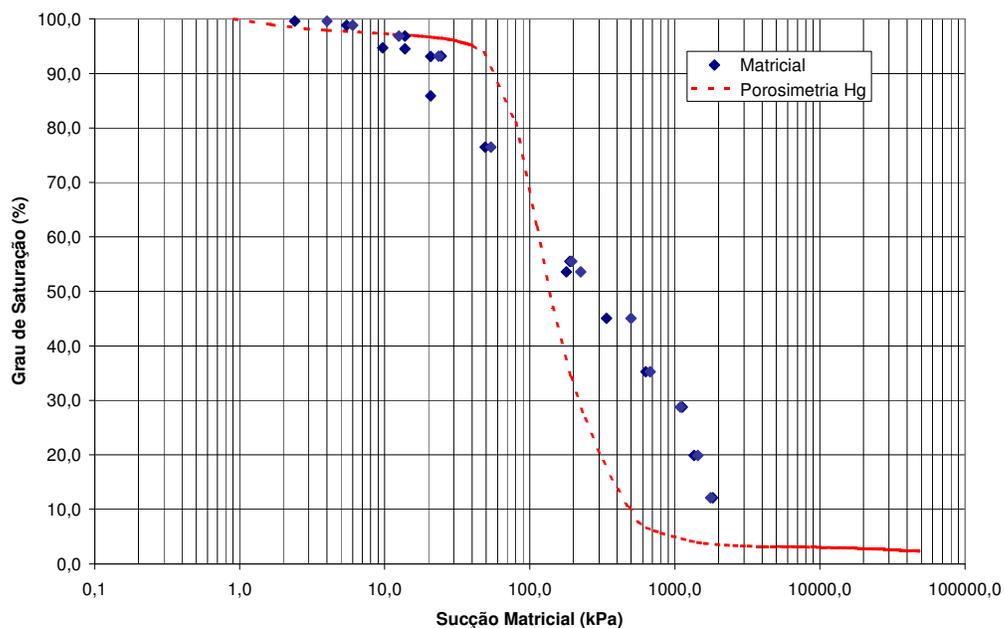


Figura 6.40 – Curva Característica de Sucção por porosimetria – Solo Residual de Filito.

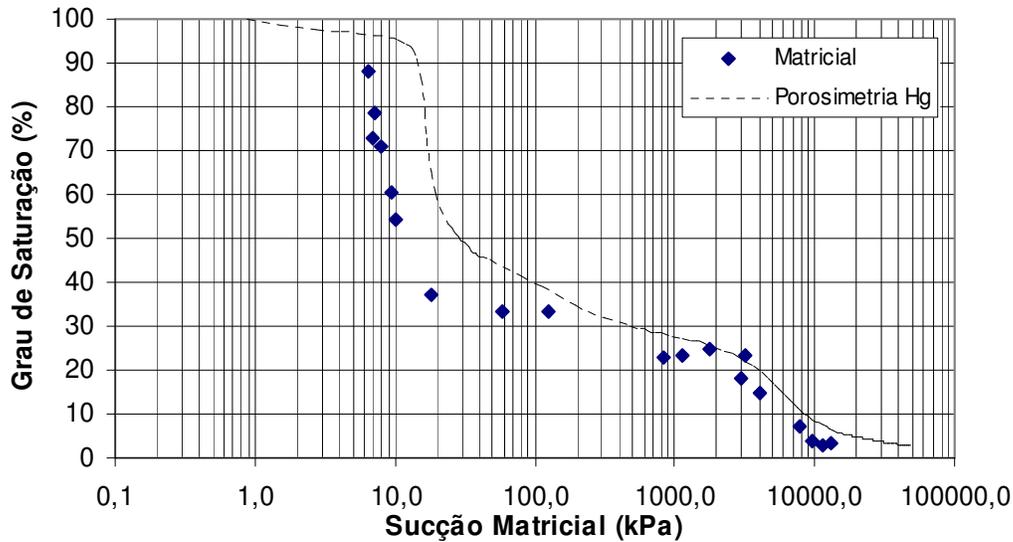


Figura 6.41 – Curva característica de Sucção por porosimetria – Solo Sedimentar do Maranhão.

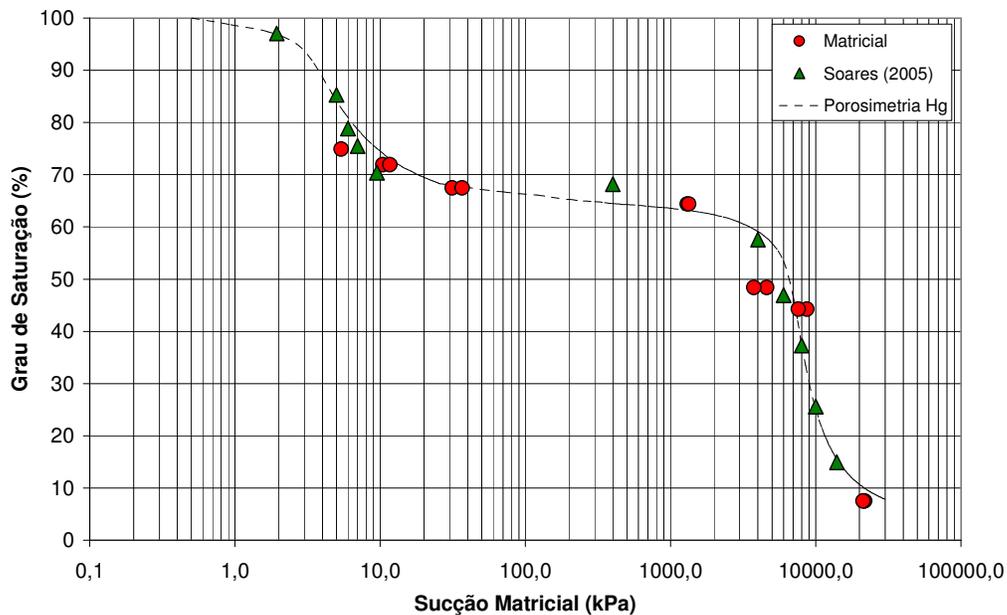


Figura 6.42 – Curva Característica de Sucção por porosimetria – Solo Coluvionar

A obtenção da curva característica de sucção a partir dos ensaios de porosimetria de mercúrio foi satisfatória para alguns dos materiais, como os residuais B0 e B1, o solo residual de Sienito e o solo Coluvionar. Os solos B2, B3, Sedimentar do Maranhão e Residual de Filito não apresentaram bons resultados comparativos, a forma da curva é semelhante, mas os valores são diferentes. Os comportamentos unimodal e bimodal apresentados pelos materiais nas curvas de retenção, também foram observados nas curvas obtidas

através do ensaio de porosimetria. O solo B3 não apresenta uma curva experimental bem definida, logo a comparação com a curva obtida pela porosimetria resulta comprometida. A curva obtida pelo ensaio de porosimetria (Figura 6.38) é essencialmente bimodal, a influência do diâmetro intermediário da distribuição de poros é pequena quando se considera a curva característica.

Em geral a curva obtida por intrusão de mercúrio apresenta-se deslocada e a direita da curva experimental. Ou seja, apresenta poros menores (ou sucções maiores para um mesmo grau de saturação). Isto pode ser justificado pelo fato de que a amostra usada na porosimetria deve ser seca em estufa antes de ser submetida ao ensaio. A secagem das amostras é uma exigência da técnica. Esta secagem pode induzir uma redução no tamanho dos poros sem alterar significativamente a forma da distribuição de poros. Este fenômeno é muito mais significativo para alguns materiais, como os solos residuais B2 e B3 (Figuras 6.37 e 6.38). Basicamente a mineralogia dos materiais do perfil São Gonçalo é a mesma, logo só o aquecimento não explica a grande diferença entre as curvas.

Numa tentativa de avaliar se o índice de vazios das diferentes amostras poderia exercer uma influência significativa nos resultados, os valores de sucção matricial obtidos foram normalizados dividindo-os pelos valores de índices de vazios correspondentes a cada amostra ensaiada. A Figura 6.43 mostra um exemplo de tal tipo de tentativa. Conforme se pode observar, as curvas continuam fornecendo valores diferentes. Assim, a variabilidade do índice de vazios sozinha não explica o fenômeno. Isto pode ser também verificado quando se considera que o solo residual de Filito e o solo residual de Sienito apresentam variabilidades de índice de vazios semelhantes (Tabelas 6.12 e 6.13). Entretanto, a curva característica obtida pela porosimetria ajusta bem aos dados experimentais para o solo de Sienito (Figura 6.39) mas não apresenta ajuste para o solo de Filito (Figura 6.40).

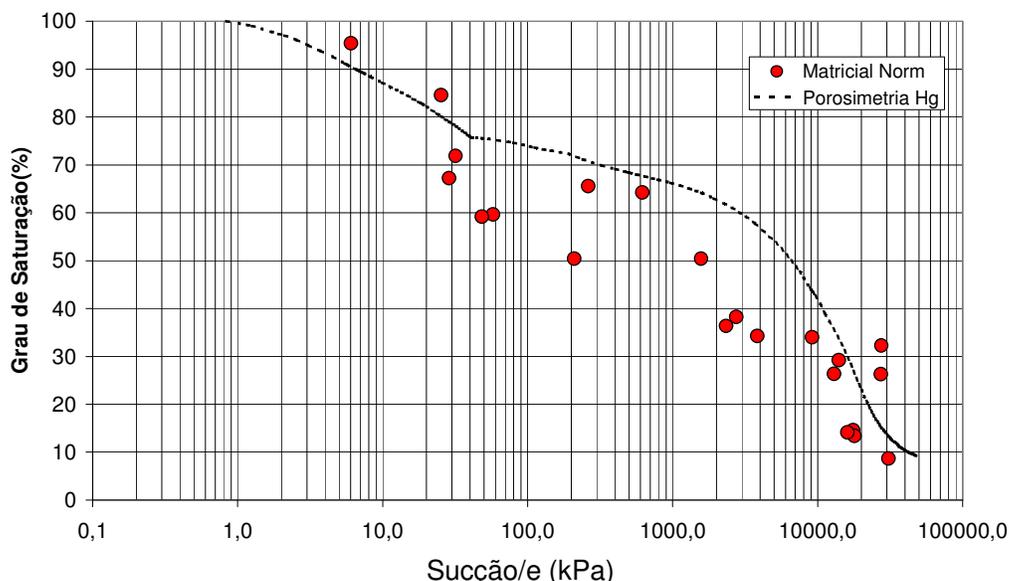


Figura 6.43 – Curva Característica normalizada – Solo B2

O fenômeno pode estar relacionado à forma dos vazios. Entretanto, inexistem evidências experimentais que permitam fazer tal afirmação. Outra hipótese poderia advir de efeitos de histerese, já que no ensaio de porosimetria de mercúrio segue-se uma trajetória de secagem e os resultados experimentais utilizados nas comparações acima envolvem tanto trajetórias de umedecimento como de secagem a partir da condição de umidade natural.

Um outro fator que deve ser considerado é a natureza dos líquidos utilizados. O mercúrio é um líquido não molhante e não apresenta o fenômeno de absorção, logo os valores obtidos pela técnica são devidos unicamente à capilaridade. Enquanto nas determinações experimentais, trabalha-se com água que é um fluido molhante, os valores obtidos são uma combinação dos efeitos da capilaridade e da absorção.

Dos parágrafos precedentes pode concluir-se que a obtenção da curva característica através do ensaio de porosimetria é um procedimento válido para alguns materiais, mas não pode ser generalizado. A utilização de curvas obtidas por esta técnica precisa da determinação de três ou mais pontos pelas técnicas tradicionais (Placa, Papel Filtro, etc) para validar a forma e a posição da curva. Dos dados experimentais pode observar-se que em alguns materiais a defasagem entre ambas curvas, experimental e porosimetria, pode ser muito importante e levar a erros importantes. Também se observou que a diferença entre os valores fornecidos pelas duas curvas (experimental e porosimetria) tem várias causas prováveis sendo difícil isolar uma causa específica e em

conseqüência aplicar alguma correção para melhorar a correspondência entre ambas.

#### **6.3.4**

##### **Ajuste por Modelos**

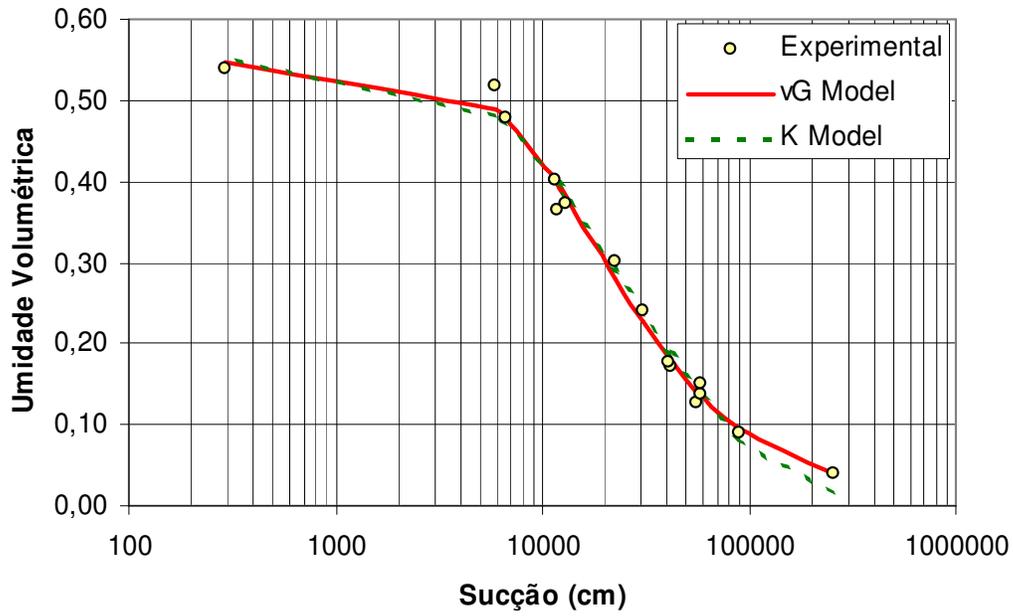
No Capítulo 3 foram mencionados e descritos alguns dos modelos disponíveis na literatura geotécnica para previsão da curva característica de sucção. Neste item são analisados os ajustes que fornecem os modelos de van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) e Kosugi (1996) aos dados experimentais obtidos. Os dados experimentais utilizados correspondem com os valores determinados a partir da umidade natural, e nos ensaios pelo método de Papel Filtro foram adotados os valores médios. A procura dos parâmetros de ajuste foi otimizada pelo método de mínimos quadrados.

Nos casos de curvas bimodais, os parâmetros foram adotados de acordo com o nível de sucção. Os parâmetros de ajuste de cada modelo estão resumidos na Tabela 6.20 e os ajustes estão mostrados nas Figuras 6.44 a 6.50.

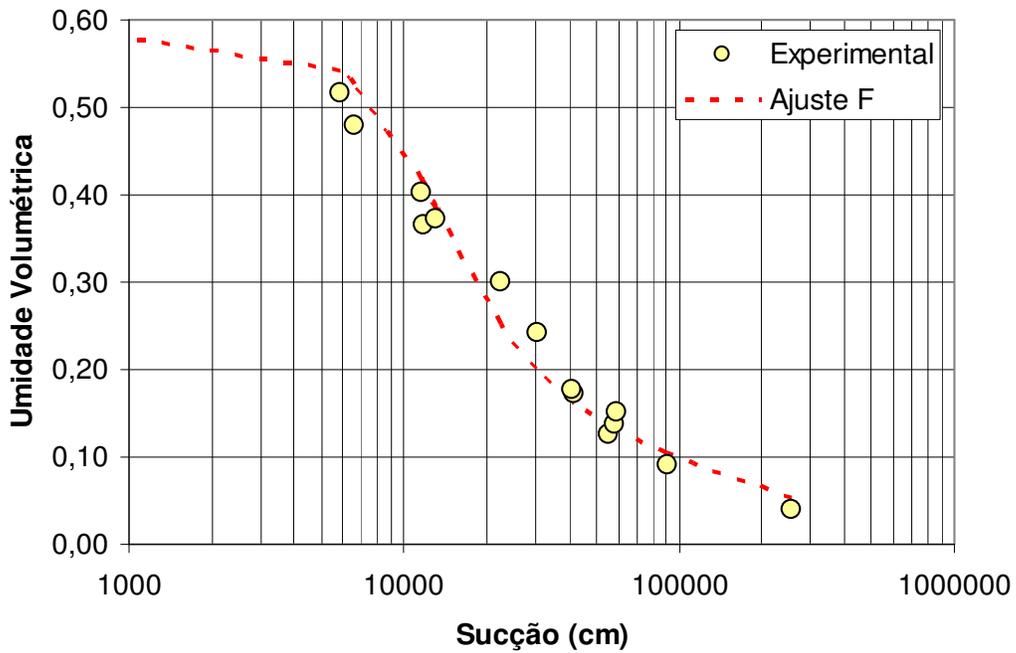
Tabela 6.20 – Parâmetros de ajuste

Modelo	van Genuchten (1980) m=1-1/n			Kosugi (1996)		Fredlund and Xing (1994)		
	$\alpha$ (1/cm)	n	m	$\psi_0$	$\sigma$	a	m	n
Residual de Sienito	0,00009	1,851	0,460	24221,56	1,256	10000	0,8	3
Residual de Filito	0,0019	1,430	0,301	2333,88	2,264	5000	3,80	0,72
Sedimentar se $h < 1000$ cm se $h \geq 1000$ cm	0,01117	4,459	0,776	0,384	1,900	70	0,41	6,06
	0,00002	2,998	0,666	51475,32	0,666	40000	0,51	11,49
Coluvionar se $h < 400$ cm se $h \geq 400$ cm	0,0244	3,354	0,702	46,73	0,600	20	0,12	10,00
	0,00001	2,702	0,630	91029,66	0,758	100000	1,00	7,00
Residual de Gnaisse B0	0,00001	2,102	0,524	103975,41	1,150	1600	4,6	1,5
	B1 se $h < 1000$ cm se $h \geq 1000$ cm	0,00032	3,590	0,722	3516,52	0,412	20	0,07
0,00001		3,110	0,678	151307,40	0,594	7000	35	2
B2 se $h < 1000$ cm se $h \geq 1000$ cm	0,00505	4,550	0,780	213,86	0,419	2	0,12	14,47
	0,00012	1,408	0,289	46674,86	2,275	700	2,22	1,10

h=sucção em cm

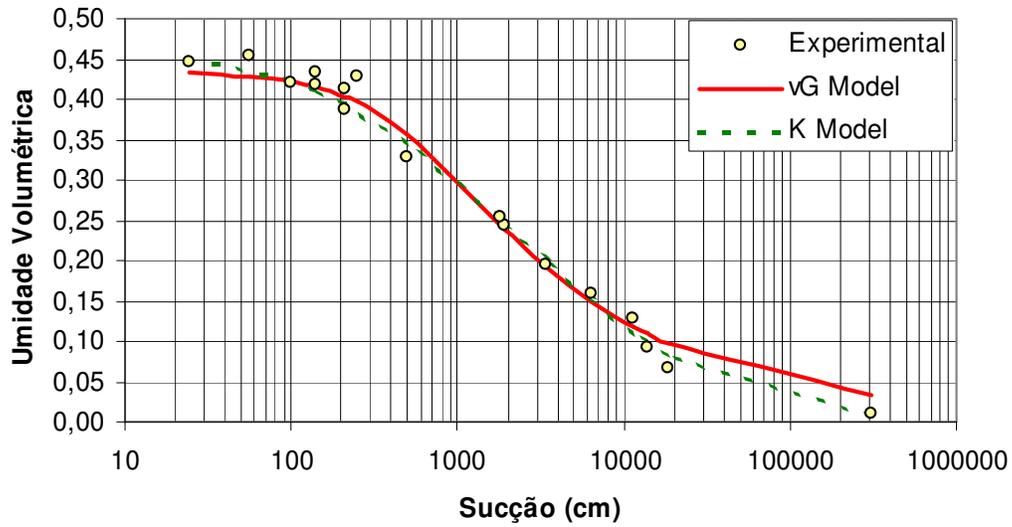


(a) Ajuste modelos de van Genutchen (1980) e Kosugi (1999)

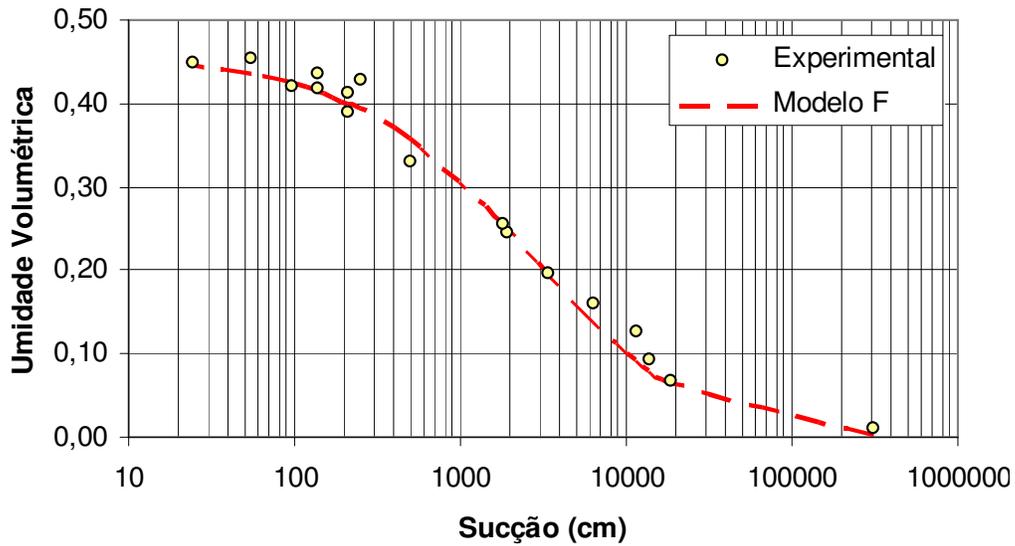


(b) Ajuste pelo modelo de Fredlund e Xing (1994)

Figura 6.44 – Ajuste da Curva Característica de Sucção - Solo Residual de Sienito.

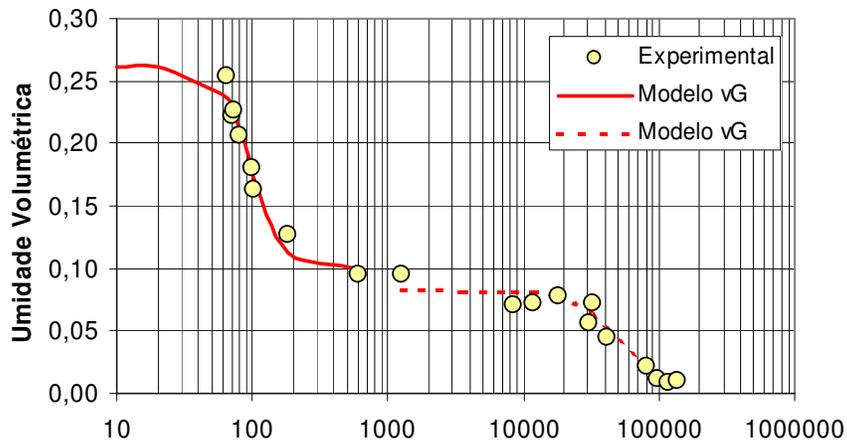


(a) Ajuste pelos modelos de van Genuchten (1980) e Kosugi (1999).

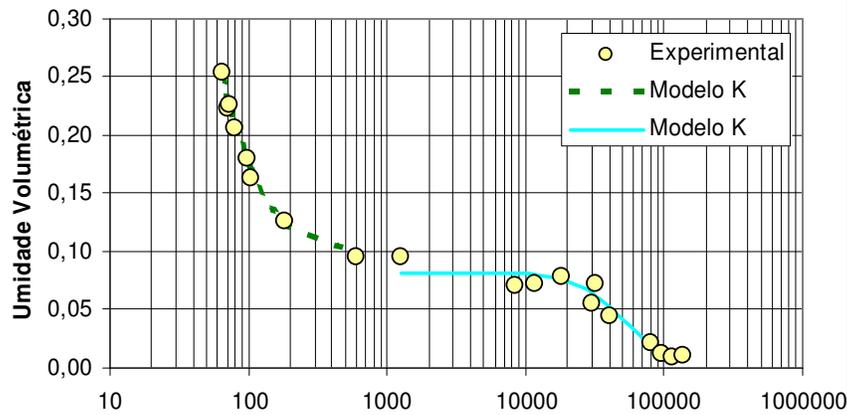


(b) Ajuste pelo modelo de Fredlund e Xing (1994)

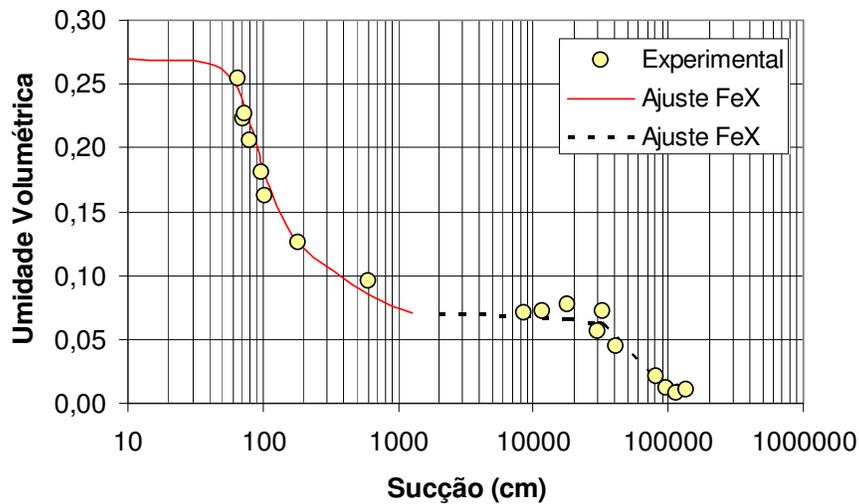
Figura 6.45 – Ajuste da Curva Característica de Sucção - Solo Residual de Filito.



(a) Ajuste pelo modelo de van Genutchen (1980).

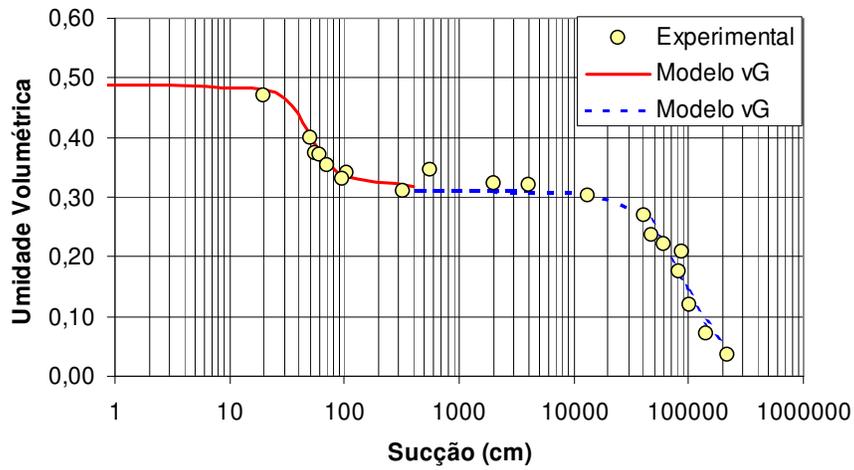


(b) Ajuste pelo modelo de Kosugi (1999).

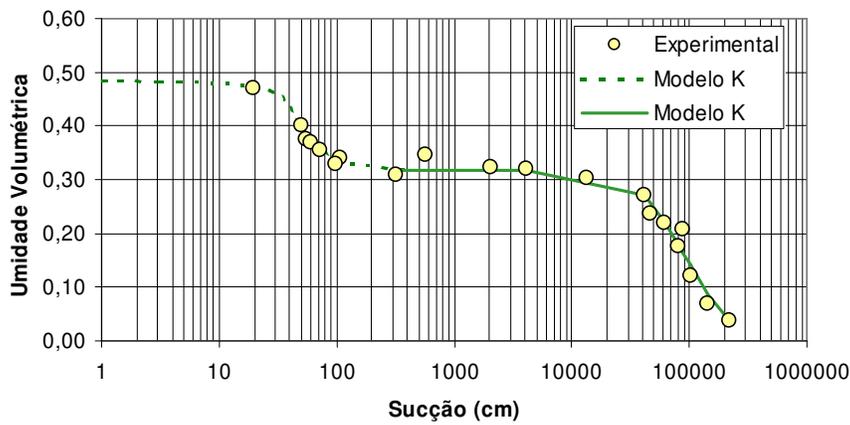


(c) Ajuste pelo modelo de Fredlund e Xing (1994).

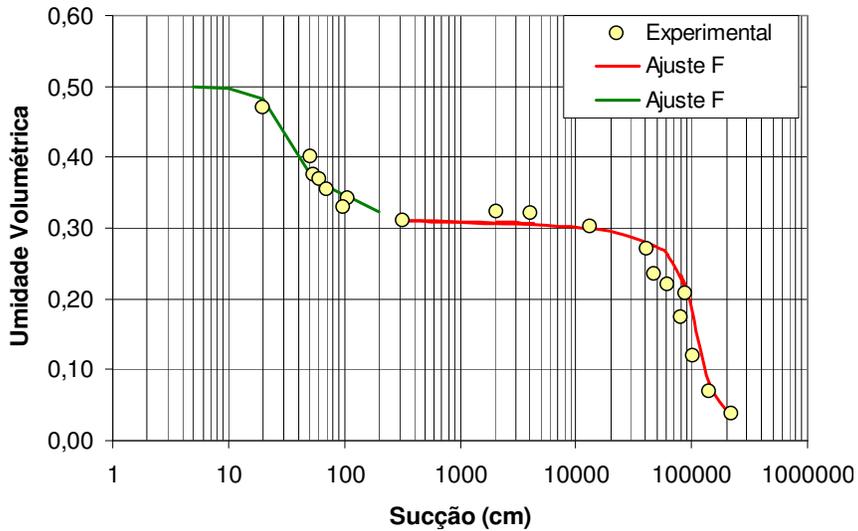
Figura 6.46 – Ajuste da Curva Característica de Sucção - Solo Sedimentar do Maranhão.



(a) Ajuste pelo modelo de van Genutchen (1980).

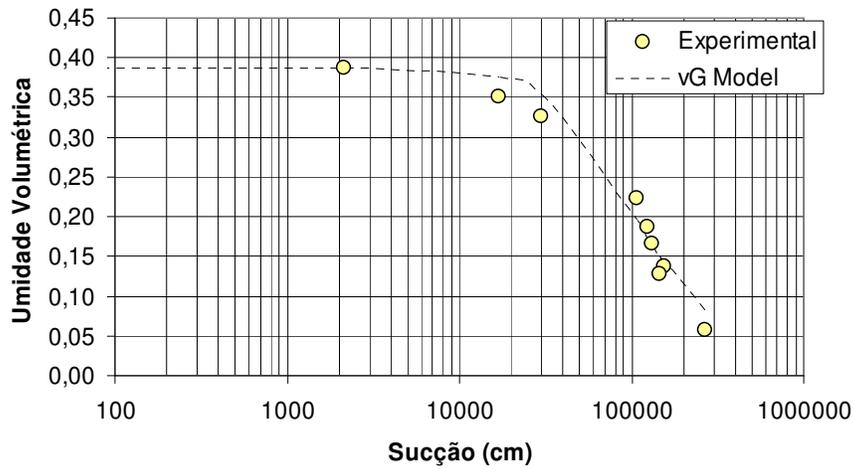


(b) Ajuste pelo modelo de Kozugi (1996).

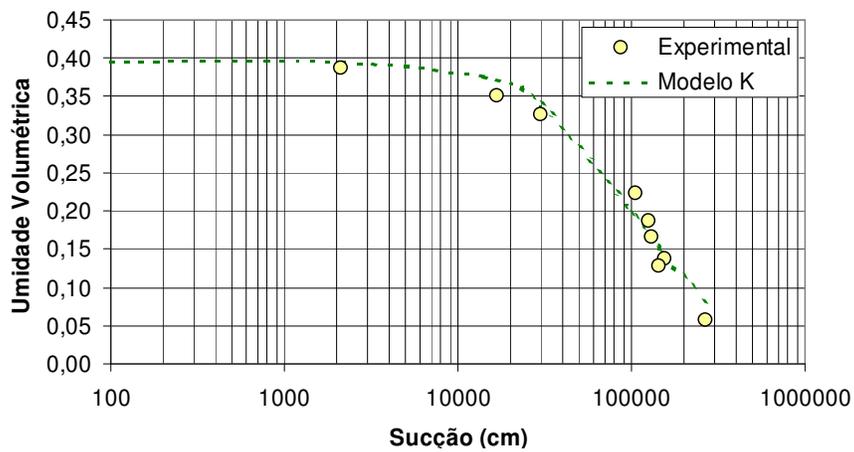


(c) Ajuste pelo modelo de Fredlund e Xing (1994).

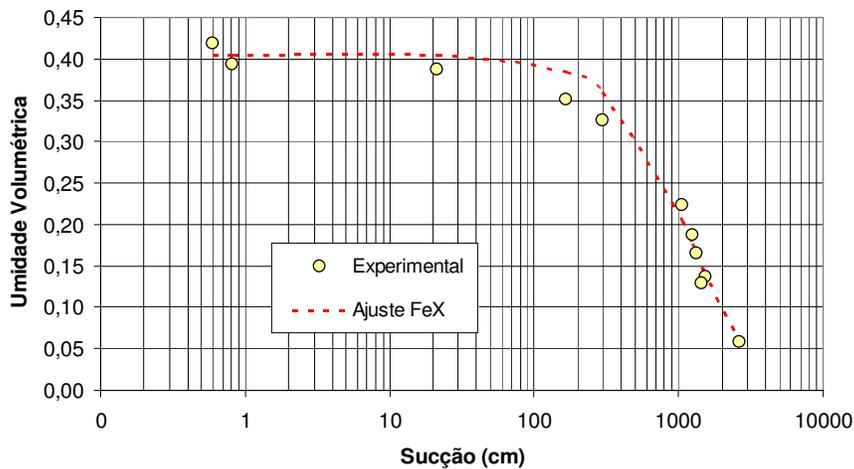
Figura 6.47 – Ajuste da Curva Característica de Sucção - Solo Coluvionar.



a) Ajuste por van Genutchen (1980)

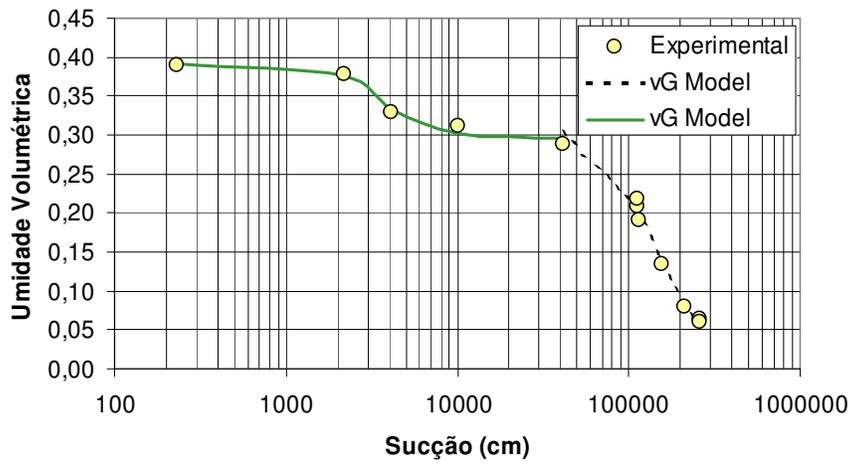


b) Ajuste por Kosugi (1996)

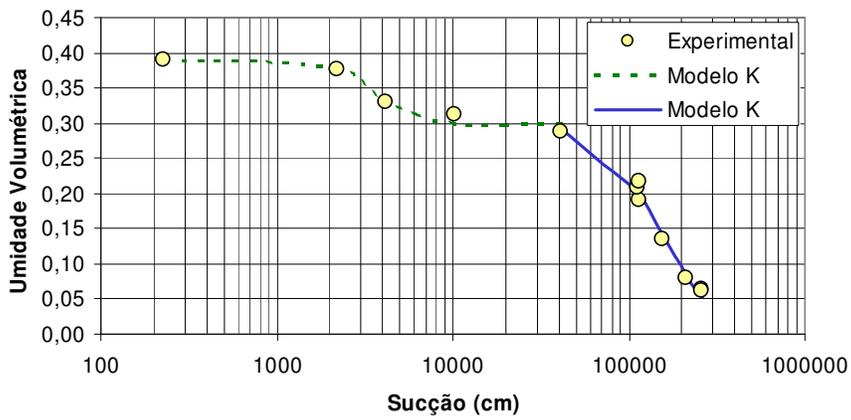


(c) Ajuste por Fredlund e Xing (1994).

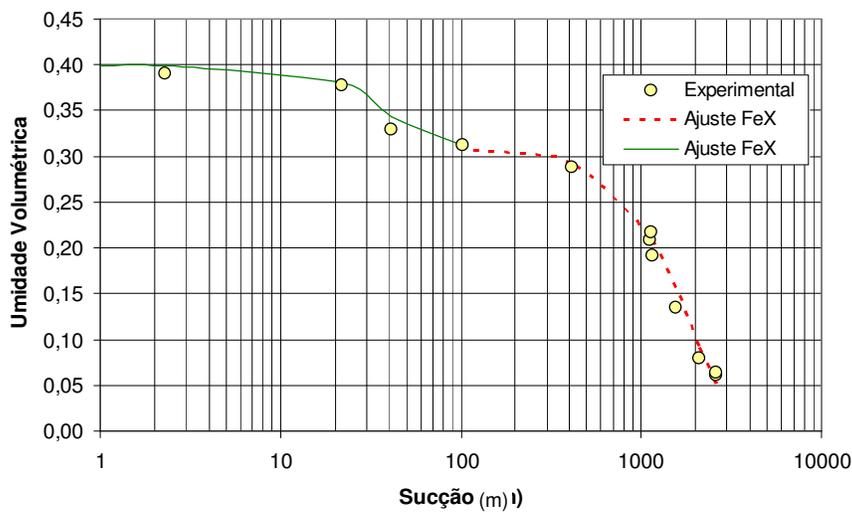
Figura 6.48 – Ajuste da Curva Característica de Sucção - Solo Residual B0



a) Ajuste por VG (1980)

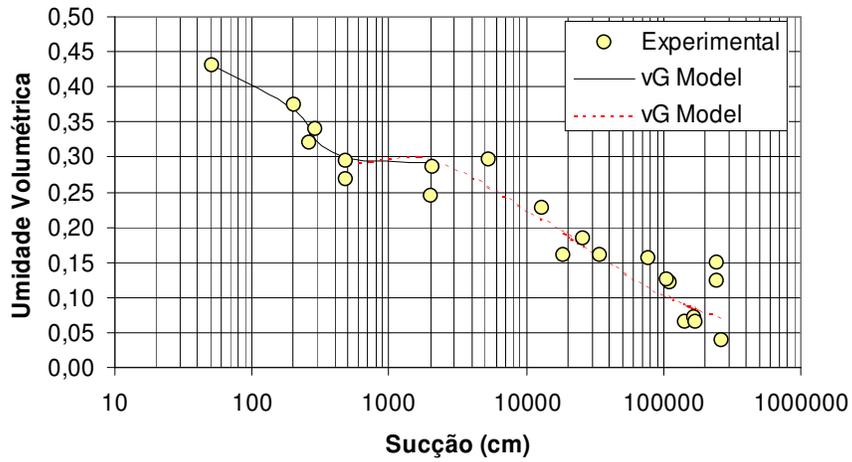


b) Ajuste por Kosugi (1996)

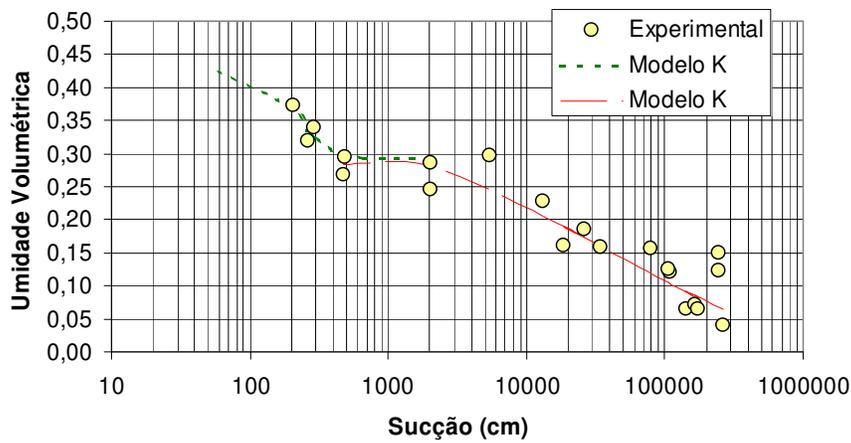


c) Ajuste por Fredlund e Xing (1994)

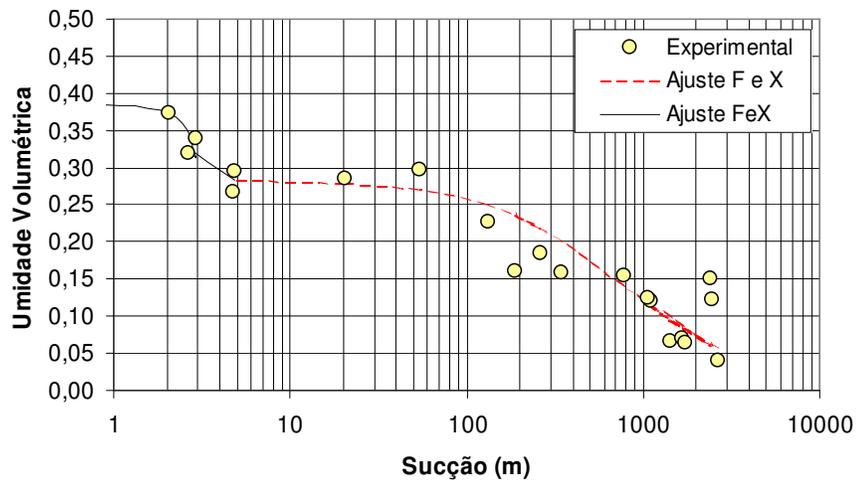
Figura 6.49 - Ajuste da Curva Característica de Sucção - Solo Residual B1



a) Ajuste pelo modelo de van Genutchen (1980)



b) Ajuste pelo modelo de Kozugi (1996)



c) Ajuste pelo modelo de Fredlund &amp; Xing (1994)

Figura 6.50 – Ajuste da Curva Característica de Sucção – Solo Residual B2

Em geral, o ajuste obtido pelo modelo de Kosugi (1996) é similar à resposta do modelo de van Genuchten (1980). O mesmo acontece quando comparado com o modelo de Fredlund & Xing (1994). Todos os modelos testados apresentaram um bom ajuste nos diferentes solos, com coeficientes de correlação maiores que 97%, na maioria dos casos. Só o solo residual B2 apresentou coeficientes de correlação menores que 95%, 91% para o modelo de van Genuchten (1980) e Kosugi (1996), e 92% para o modelo de Fredlund & Xing (1994). Não foi possível obter um ajuste aceitável para o solo B3 com nenhum dos modelos, em todos os casos o coeficiente de correlação foi menor que 90%, isto é devido à forma da curva experimental. Como já foi mencionado, a curva experimental deste material não apresenta uma forma bem definida em função da heterogeneidade própria do material.

## 6.4

### Distribuição de poros

Com o intuito de procurar entender as diferenças observadas entre a curva experimental e a determinada a partir dos dados de porosimetria, foram utilizados os ajustes obtidos pela aplicação do modelo de van Genuchten (1980) aos dados experimentais para obter as distribuições de poros correspondente e compará-la com as resultantes dos ensaios de porosimetria.

O diâmetro de poro correspondente com cada valor de sucção da curva característica experimental foi obtido pela aplicação da equação de Laplace (item 5.2.3). Como função de distribuição utilizou-se a relação  $\delta\text{Sat}/\delta\text{LogD}$ , sendo que  $\delta\text{Sat}$  representa o incremento no grau de saturação e  $\delta\text{LogD}$  o incremento no logaritmo do diâmetro.

A Tabela 6.21 resume os valores obtidos e nas Figuras 6.51 a 6.57 estão mostradas as distribuições resultantes.

Tabela 6.21 – Comparação das Distribuições de poros

Solo	Pico na porosimetria de	Pico na porosimetria da
	Hg D ( $\mu\text{m}$ )	CC D ( $\mu\text{m}$ )
Residual de Filito	2,592	2,670
Residual de Sienito	Região entre 0,10 – 0,60	0,382
Coluvionar	0,023	0,027
	39,25	67,28
Sedimentar	0,050	0,055
	17,22	34,31
Residual de Gnaisse		
B0	0,0139	0,0228
B1	0,0158	0,0274
	1,510	0,884
B2	0,0151	0,1880
	10,789	15,347

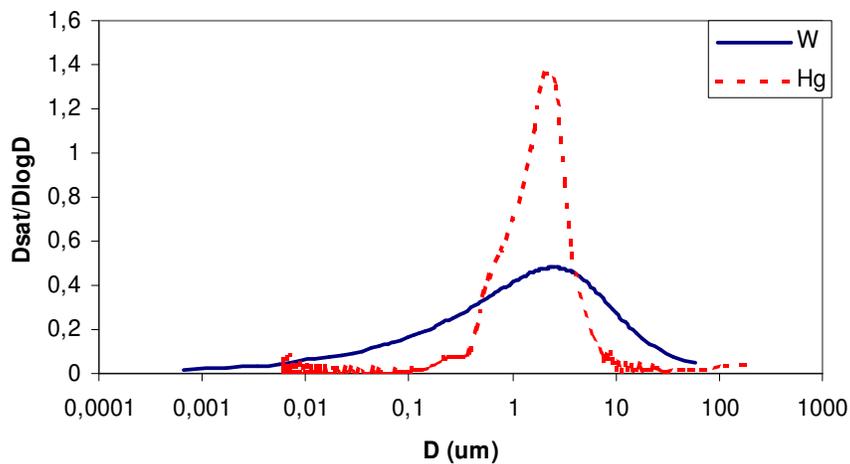


Figura 6.51 – Distribuição de poros – Solo Residual de Filito

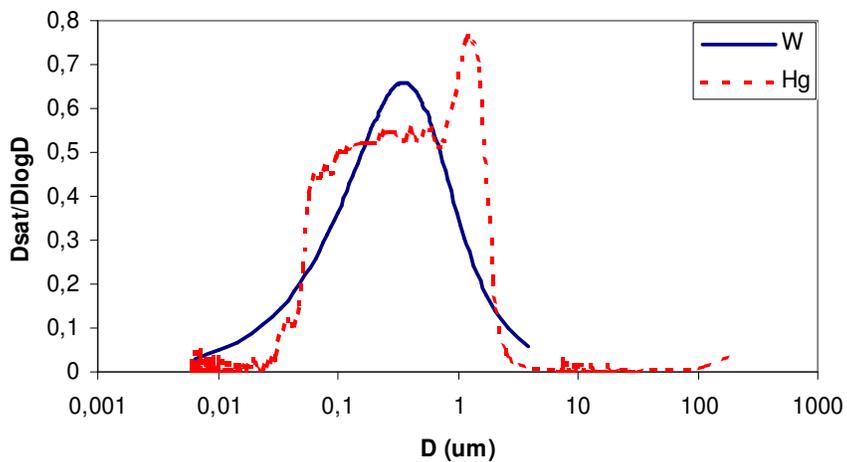


Figura 6.52 – Distribuição de poros – Solo Residual de Sienito

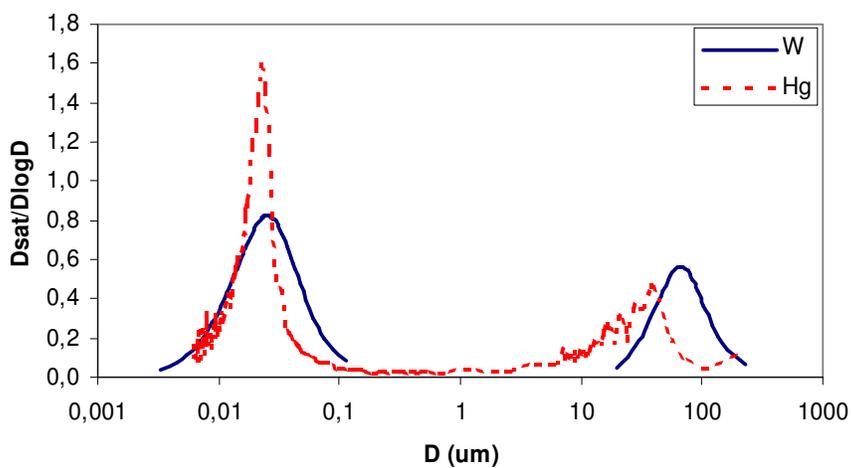


Figura 6.53 – Distribuição de poros – Solo Coluvionar

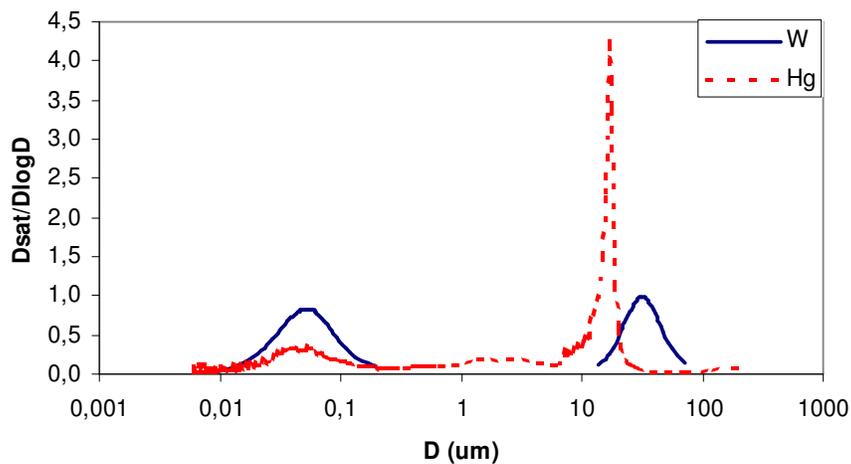


Figura 6.54 – Distribuição de poros – Solo Sedimentar

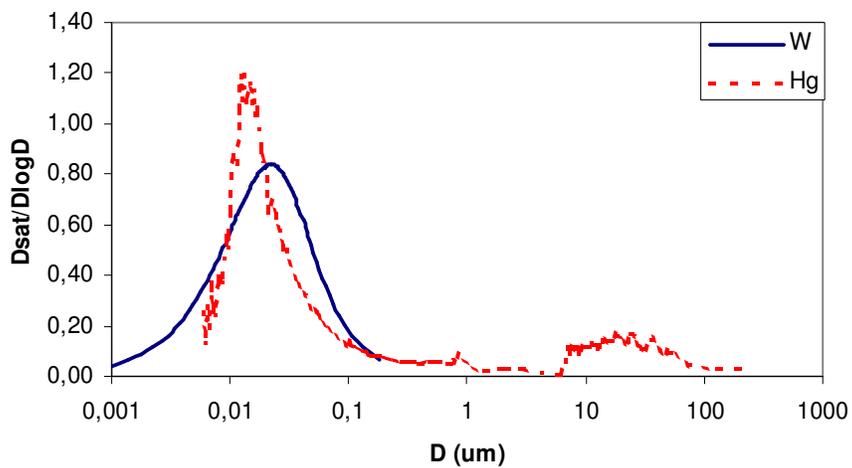


Figura 6.55 – Distribuição de poros – Solo Residual de Gnaiss B0

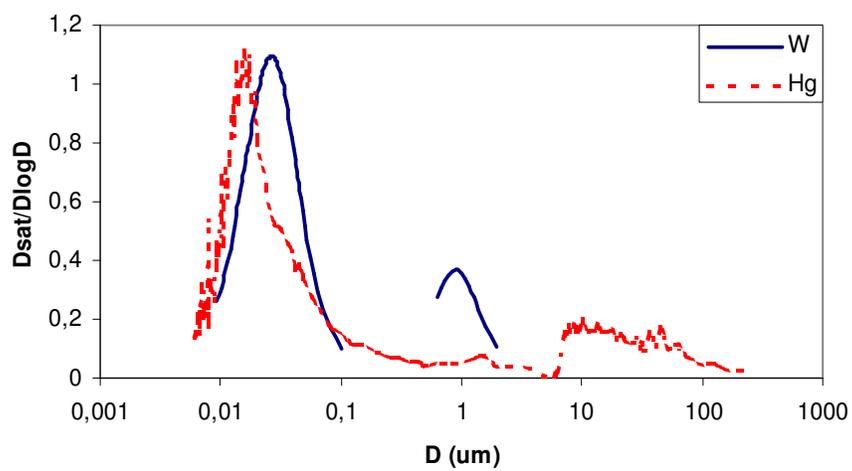


Figura 6.56 – Distribuição de poros – Solo Residual de Gnaiss B1

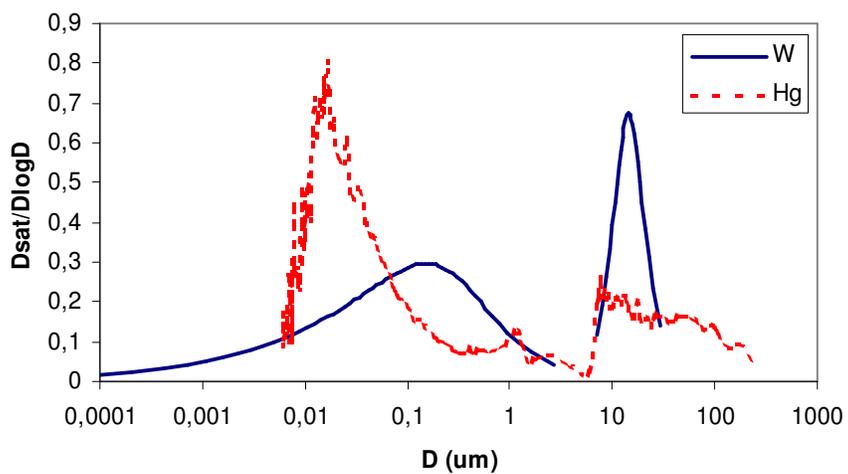


Figura 6.57 – Distribuição de poros – Solo Residual de Gnaiss B2

Observando as Figuras verifica-se que as distribuições de poros são semelhantes nos casos dos solos residuais de Filito, Sienito, B0, e B1, e nos solos coluvionar e sedimentar. Diferindo no caso do solo residual B2.

Em todos os casos a curva obtida por intrusão de mercúrio apresenta diâmetros menores, de maneira similar ao já observado na determinação das curvas características. No caso do solo residual B2 (Figura 6.57) este deslocamento é mais pronunciado. Como já mencionado no item 6.3.3, isto pode ser função da secagem das amostras e da natureza dos líquidos utilizados na porosimetria.

Deve considerar-se também que as distribuições obtidas partem da hipótese que os poros são cilíndricos. A distribuição real pode ser bastante diferente já que a forma dos vazios não necessariamente é cilíndrica. Especificamente no caso dos solos residuais de gnaiss (B0, B1 e B2), as lâminas petrográficas apresentadas (no Capítulo 2 e no Anexo 1), mostram que os vazios apresentam formas irregulares ou de placas. Uma distribuição mais real poderia ser obtida utilizando as ferramentas da microscopia digital com um número representativo de amostras.

Como a finalidade desta análise é comparativa, a hipóteses de existência de poros cilíndricos não afeta a comparação. Considerando que os resultados de porosimetria correspondem a uma única amostra e, os demais a um mínimo de 10 amostras, é aparente que as amostras utilizadas nos ensaios de porosimetria foram representativas dos materiais analisados, com exceção da amostra correspondente com o solo B2.

Os resultados também mostram que é possível obter a distribuição de poros do material a partir da curva característica de sucção determinada de maneira tradicional, desde que a curva permita o ajuste por um dos modelos apresentados no Capítulo 3.

## 6.5

### Comentários Finais

As curvas características de sucção foram obtidas por uma combinação de várias técnicas de ensaio. A sonda de umidade relativa funcionou de forma satisfatória, apresentando-se como uma alternativa ao método de Papel Filtro para a medição de sucções elevadas. O limite de medição do Método de Papel Filtro depende de sua umidade na condição de seco ao ar. Alguns materiais

podem apresentar valores maiores que este limite, como aconteceu com o solo residual de Filito na condição de umidade higroscópica.

As curvas obtidas para os diferentes solos permitiram observar que não existe uma relação direta entre a curva característica de sucção do material e suas propriedades índices. Por exemplo, solos com granulometrias muito diferentes apresentaram curvas semelhantes (solos residuais B0 e B1). Solos com granulometrias e parâmetros físicos muito parecidos (solos residuais B2 e B3) apresentaram curvas de retenção diferentes. Só o conhecimento das propriedades índices não permite prever a forma e os valores presentes na curva de retenção.

Os resultados das diferentes técnicas apresentaram, na maioria dos casos, uma curva consistente. Pelo que esta metodologia de combinação de técnicas deve ser utilizada sempre que seja possível.

A determinação de uma curva única para os solos residuais de gnaiss mais jovens (B2 e B3) mostrou-se problemática, neste tipo de materiais seria mais interessante falar da existência de uma faixa de variação de umidades para um mesmo nível de sucção. Também neste tipo de materiais derivados de rochas heterogêneas, ainda muito influenciados pelas características da rocha mãe, é importante a utilização de diferentes corpos de provas nos ensaios de sucção. A utilização de uma quantidade grande (>10) permite incluir, indiretamente, as características de heterogeneidade próprias do material na curva característica de sucção.

A existência potencial de histerese nos solos residuais de gnaiss, ou seja, a influência da trajetória escolhida no valor final da umidade (ou da sucção) é aparentemente menos importante que a própria variabilidade do material.

Os resultados analisados mostram que a obtenção da curva característica de sucção a partir da porosimetria é uma alternativa válida para alguns solos, não podendo ser generalizada. A influência da preparação das amostras e das propriedades do mercúrio, na posição da curva de porosimetria deve ser investigada mais profundamente.

A utilização de modelos para ajustar os valores experimentais resultou satisfatória para todos os materiais, residuais e não residuais. Deve considerar-se nestes ajustes as características da curva de retenção, unimodal, bimodal, etc, para a procura dos parâmetros de ajuste.