7
Função de Permeabilidade - Resultados

7.1.
Introdução

Foi determinada a função de permeabilidade para dois dos solos analisados no Capítulo 6, o solo residual B1 do perfil de alteração de gnaisse e o solo sedimentar do Maranhão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

7.2
Ajustes no sistema

Para verificar a resposta do sistema nos ensaios de vazão constante, testou-se o comportamento do conjunto bomba - transdutor diferencial, aplicando diferentes vazões no permeâmetro utilizando um corpo de prova saturado (pedra porosa grossa). Nestes testes foi montado o ensaio da maneira descrita no Capitulo 5, utilizando a pedra porosa como material saturado, com aplicação de tensão confinante e contrapressões de água no topo e na base. A pressão do topo é mantida constante e a da base é função da vazão injetada. Monitorou-se a pressão da base por meio do transdutor instalado na base e do transdutor diferencial ligado ao topo e a base da amostra. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 7.1 e 7.2. Conforme mostrado na Figura 7.1, para uma vazão da ordem de $3x10^{-5}$ cm^3/s, o sistema atinge um gradiente constante em aproximadamente 13000s, e a vazão aplicada gera uma diferença de pressão de 11 kPa entre o topo e a base. A resposta em forma de degraus do transdutor diferencial, observada na Figura 7.1, foi função do ganho escolhido para o instrumento neste teste, por conta deste comportamento o valor do ganho foi aumentado para melhorar a sensibilidade do transdutor nos ensaios seguintes.

Na Figura 7.2, a vazão aplicada na base foi de $3,54x10^{-4}$ cm^3/s, o que gerou uma diferença de pressão de aproximadamente 65kPa entre o topo e a base, e o equilíbrio foi atingido em 5000s. Estes testes permitiram ter uma idéia

dos valores mínimos de incrementos de pressão gerados com a bomba e do tempo mínimo necessário para atingir a situação de equilíbrio. O tempo necessário é inversamente proporcional à vazão aplicada, e o incremento de pressão diretamente proporcional à vazão aplicada.

Executou-se também, a aplicação de incrementos de pressão na base em degraus, por meio do sistema de válvulas, mantendo o valor de pressão no topo constante (Figura 7.3). Conforme pode ser verificado nesta Figura, a resposta do transdutor é consistente com os valores de pressão aplicados no topo e na base. Este teste também permitiu verificar a não existência de vazamentos o de bolhas de ar nas tubulações, o resposta do transdutor diferencial é simultânea com o incremento de pressão aplicado na base.

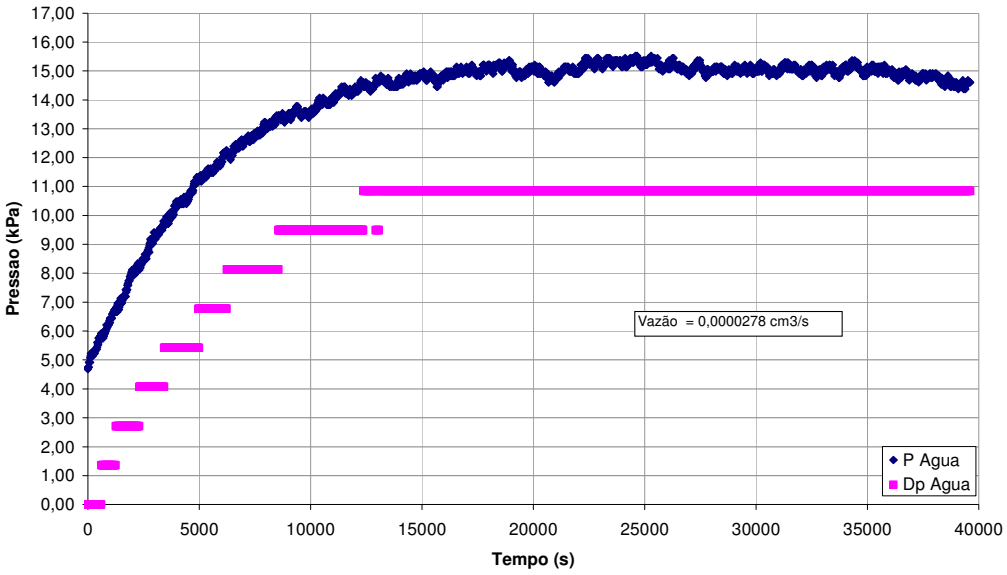

Figura 7.1 - Resposta do transdutor diferencial para a aplicação de uma vazão constante de $2{,}78.10^{-5} cm^3/s = 0{,}10\ cm^3/h$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

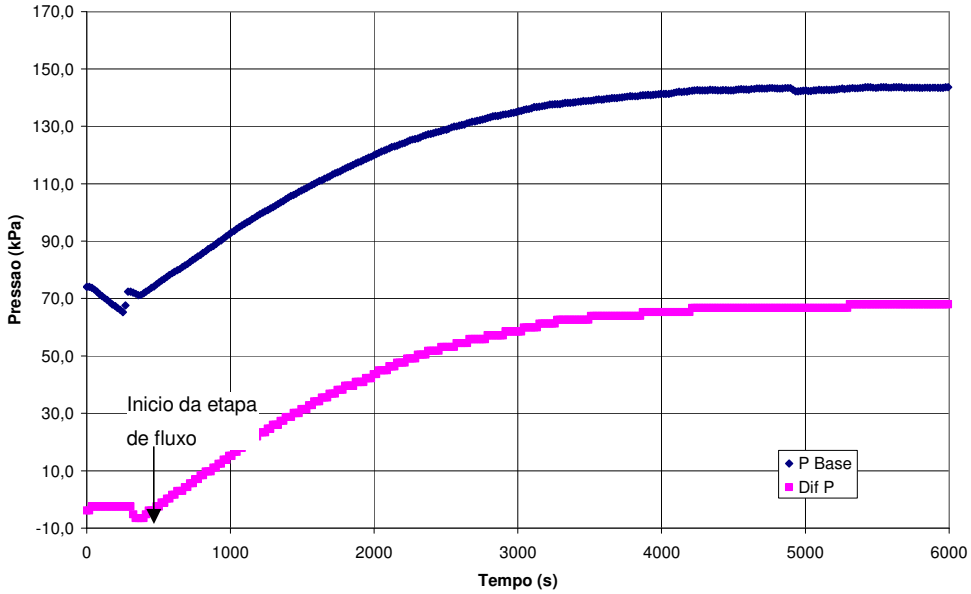

Figura 7.2 - Resposta do transdutor diferencial para a aplicação de uma vazão constante de $3{,}54.10^{-4}$ cm^3/s = 1,27 cm^3/h

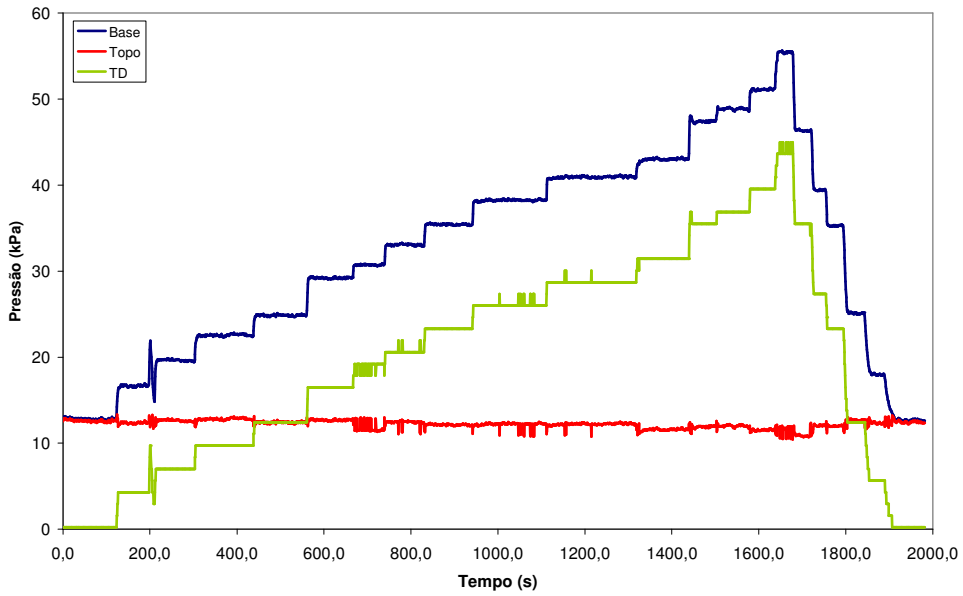

Figura 7.3 - Resposta do transdutor diferencial ao incremento da pressão em degraus.

Confirmada a resposta satisfatória do transdutor diferencial, foi testada a resposta do sistema de medição de variação de volume, ou seja, o sistema balança - reservatório. Para verificar efeitos potenciais de variação de temperatura na medição de variação de volume foi colocado um corpo rígido no permeâmetro e monitorada a variação da massa registrada na balança com a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

variação da temperatura da sala. Na Figura 7.4 está mostrado o resultado obtido sem a introdução de nenhuma proteção do recipiente e da balança às variações de temperatura da sala e, na Figura 7.5, a resposta obtida com a introdução da proteção às variações de temperatura da sala.

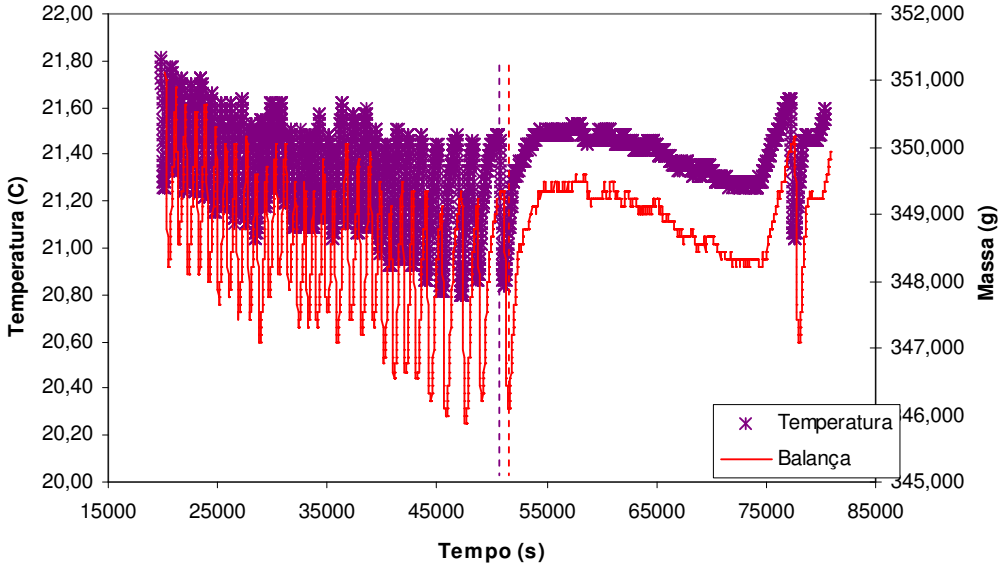

Figura 7.4 – Variação de massa de água com a variação da temperatura sem proteção da balança e recipiente.

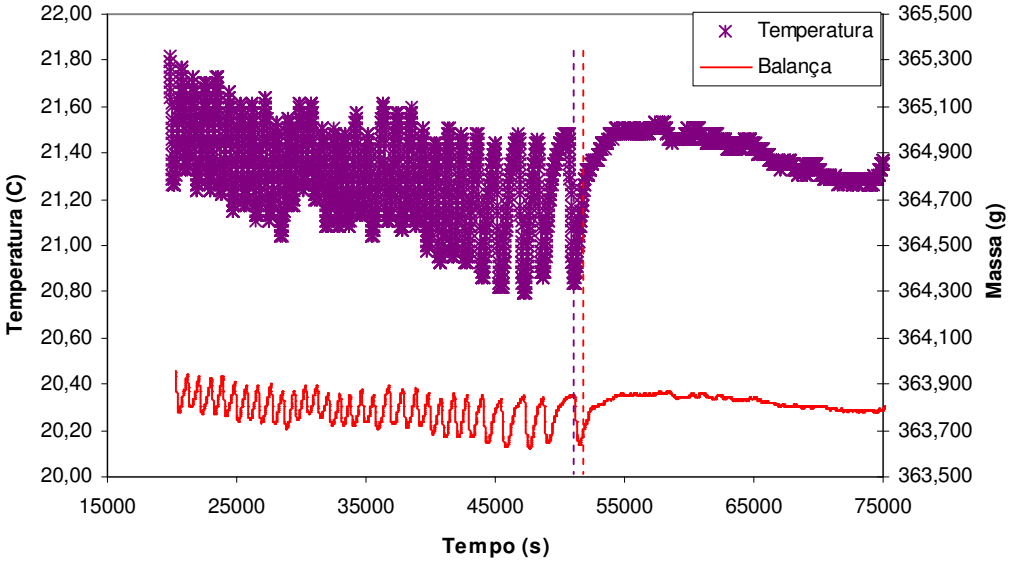

Figura 7.5 – Variação de massa de água com a variação da temperatura com proteção em isopor da balança e recipiente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Como se pode observar nas Figuras 7.4 e 7.5, a balança segue o mesmo padrão de comportamento que a variação de temperatura, indicando que as medidas de variação de volume são fortemente sensíveis a variações de temperatura da sala de ensaios. No primeiro caso (Figura 7.4) uma variação de temperatura de aproximadamente 1 grau centígrado produz uma variação de massa de água no recipiente de 3,250g, o que equivale a uma variação de volume de 1,609 cm^3. Esta variação de volume é muito maior do que a esperada no ensaio e, portanto, inadmissível. Observa-se também, na Figura 7.4, um retardo no tempo na resposta de balança (na ordem de 855 segundos). Como o mesmo comportamento ocorre na Figura 7.5, este retardo pode ser decorrente da variação de diâmetro das linhas de drenagem com a temperatura. No segundo caso (Figura 7.5), onde a balança foi protegida, o comportamento da variação de massa segue o mesmo padrão que o da variação da temperatura da sala, mas, agora, o valor desta variação é de 0,200g o que equivale a uma variação de volume de 0,107cm^3 no corpo de prova.

Durante a execução dos ensaios trabalhou-se sempre com a balança e o recipiente protegidos da variação de temperatura da sala e, em todos os ensaios, foi registrada a temperatura para corrigir a variação de massa registrada. Para isto utilizou-se uma sonda similar à utilizada nos ensaios de determinação de umidade relativa (Sonda PUC).

7.3
Metodologia de Cálculo

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade utilizou-se a lei de Darcy, a partir das medições de vazão e de pressões dos ensaios. As simulações numéricas (Item 5.1.6) indicaram que a distribuição de velocidades no interior do corpo de provas não é uniforme e que as vazões registradas nas bordas laterais do corpo de prova são desprezíveis. Para considerar esta situação, a área utilizada no cálculo das permeabilidades é a correspondente à área dos discos porosos de alta entrada de ar, onde os resultados das simulações para o equipamento mostraram uma distribuição mais uniforme.

Considerou-se também a influência das pedras porosas que, como foi mostrado nas simulações, não é desprezível. Para tal, calculou-se o valor da condutividade hidráulica admitindo que o sistema é constituído por três camadas: pedra porosa – solo - pedra porosa. Considerando que a vazão é a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

mesma nas três camadas e que a perda de carga do sistema é a somatória das perdas de cargas em cada camada, ou seja:

$$q = q_{base} = q_{solo} = q_{topo} \quad \textbf{Equação 7-1}$$

e

$$\Delta H = \Delta H_{base} + \Delta H_{solo} + \Delta H_{topo} \quad \text{Equação 7-2}$$

a permeabilidade do solo resulta:

$$kw = \frac{Hs}{\frac{Ht}{k} - \left(\frac{H_T}{k_T} + \frac{H_B}{k_B} \right)} \quad \text{Equação 7-3}$$

onde

kw= coeficiente de permeabilidade,

Hs= altura do corpo de provas,

H_T= espessura da pedra porosa do topo,

H_B= espessura da pedra porosa na base,

$Ht = Hs + H_T + H_B$ = altura total do sistema,

k_T= coeficiente de permeabilidade da pedra porosa de topo

k_B= coeficiente de permeabilidade da pedra porosa de base

k= coeficiente de permeabilidade do sistema = q/(ixA)

i= gradiente total

A= área das pedras porosas

7.4.
Ensaios executados

Antes da execução dos ensaios não saturados foram determinados os coeficientes de permeabilidade dos discos porosos e dos solos saturados. A permeabilidade dos discos foi determinada seguindo a metodologia descrita no item 5.1.4 e, a dos solos saturados em ensaios de carga constante executados em célula triaxial. Nestes ensaios utilizaram-se amostras de 10 cm de diâmetro, gradiente de 10 e tensão efetiva de confinamento da mesma ordem da utilizada nos ensaios não saturados. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 7.1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Tabela 7.1 – Valores de Permeabilidade Saturada

Material	ksat (cm/s)
Disco poroso Topo	$1{,}42 \times 10^{-6}$
Disco poroso Base	$1{,}07 \times 10^{-6}$
Solo B1	$1{,}14 \times 10^{-6}$
Solo Sedimentar	$1{,}90 \times 10^{-4}$

Os valores de permeabilidade dos discos porosos obtidos são menores que os esperados para o disco de 1BarH utilizado (Item 5.1.6 - Tabela 5.4), e menores que os informados por Carrillo (2000). Por esta razão os ensaios de permeabilidade foram executados três vezes. Em todos os casos os resultados foram similares aos indicados na Tabela 7.1. As causas da diminuição da permeabilidade dos discos porosos não foram investigadas. Como medida adicional, antes da execução de cada ensaio era circulada água pelos discos porosos durante um período de quatro a cinco horas para garantir a saturação do sistema e, no intervalo entre novos ensaios, verificações da permeabilidade dos discos foram efetuadas.

As funções obtidas para ambos os materiais, apresentadas a seguir, são produto da execução de ensaios de carga constante e de vazão constante.

7.4.1
Solo Residual B1

Na Tabela 7.2 estão resumidas as características básicas dos ensaios executados no Solo Residual B1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Tabela 7.2 – Resumo dos Ensaios de Permeabilidade - Solo B1

Metodologia	Ensaio	Altura cp (cm)	Pressão de água (kPa)		Pressão de ar (kPa)		Tensão Normal líquida	Tempo de ensaio
			Topo	Base	Topo	Base	(kPa)	(h)
Carga Constante	1	3	39,91	48,52	95,5	95,5	139,5	158
	2	3	17,3	20,10	95,5	95,5	139,5	294
	3	3	33,25	35,18	95,5	95,5	120,2	234,2
	4	3	72,58	43,87	95,5	95,5	120,2	168,5
	5	6	47,3	51,3	76,7	67,4	120,2	297
	6	6	47,3	51,3	76,3	75,7	120,2	290
			Equalização					
Vazão Cte	7	3	15,0	16,0	95,0	96,00	152,5	288,7
	8	6	30,50	31,90	74,90	76,57	120,2	360,5

No solo B1 ainda foram executados três ensaios de vazão constante. Por problemas de vazamento na bomba e no sistema de medição de pressões, os mesmos tiveram que ser descartados. Os vazamentos na bomba aconteceram na seringa de injeção (Figura 5.4), como o sistema foi testado na etapa de calibração, acredita-se que o embolo da seringa não está corretamente retificado. Um ensaio de carga constante foi perdido por falta de energia no laboratório.

Nas Figuras 7.6, 7.7 e 7.8 estão mostrados os comportamentos típicos observados nas etapas de equalização de sucção e aplicação de vazão constante ou de carga constante para os ensaios no solo B1. As características dos corpos de provas e os gráficos específicos correspondentes a cada ensaio estão apresentados no Anexo 3. Nas Figuras estão indicada qual foi a configuração utilizada, Layout 1 ou 2, segundo a descrição apresentada no item 5.1.1. Nos ensaios por vazão constante (Figura 7.6) estão informados os valores de vazão de saída no topo da amostra e a diferença de pressão (eixo DP nas Figuras) registrada entre o topo e a base como conseqüência da vazão injetada. Nos ensaios por carga constante, Figuras 7.7 e 7.8, estão apresentadas as vazões registradas no equilíbrio para o topo e base e as pressões registradas no equilíbrio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

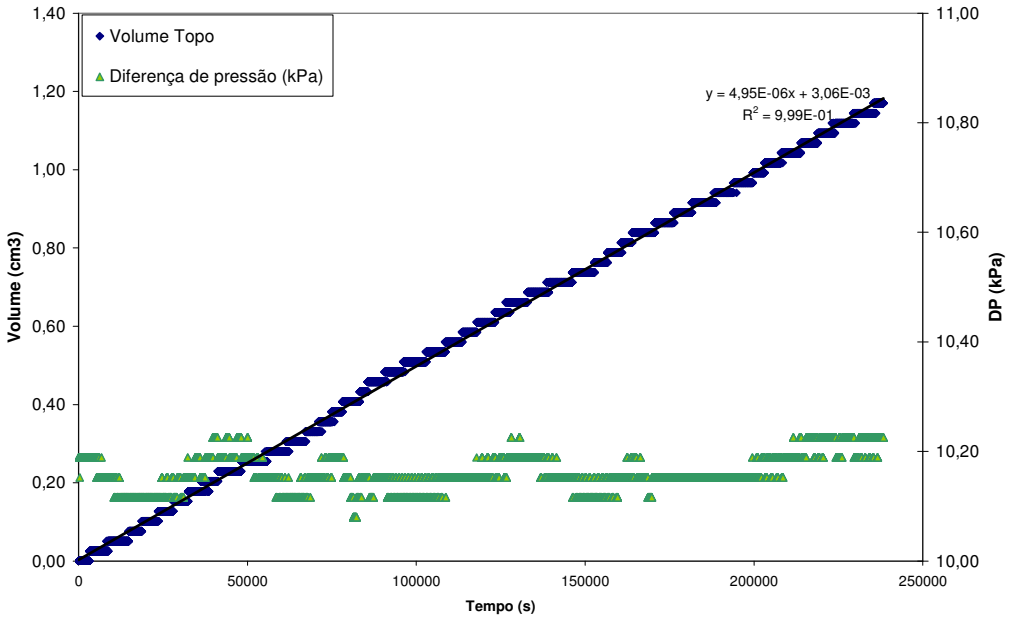

Figura 7.6 - Resposta típica do ensaio por carga constante (Solo B1) – Layout 2

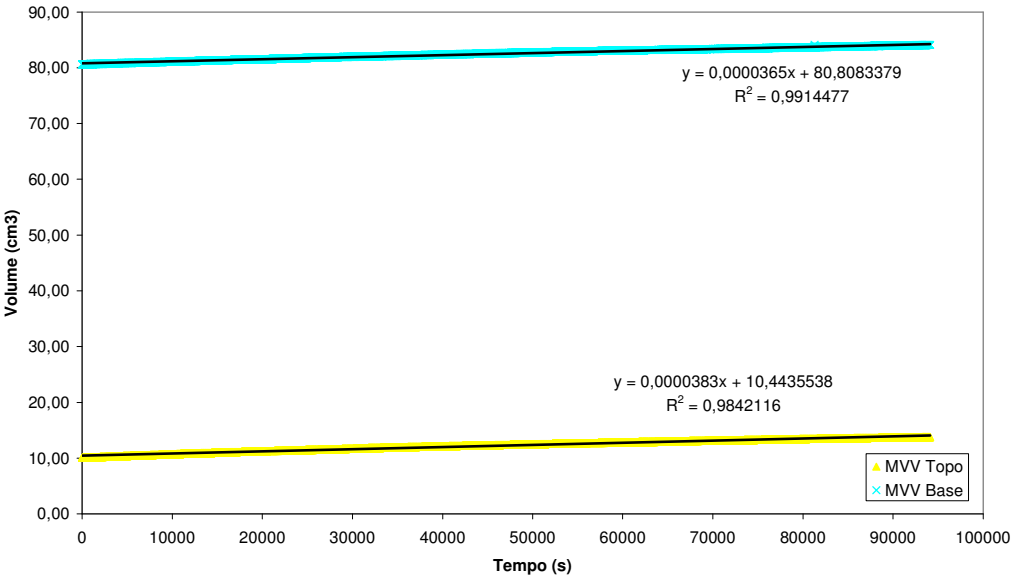

Figura 7.7 – Vazões no equilíbrio - Ensaio por carga constante (Solo B1) – Layout 1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

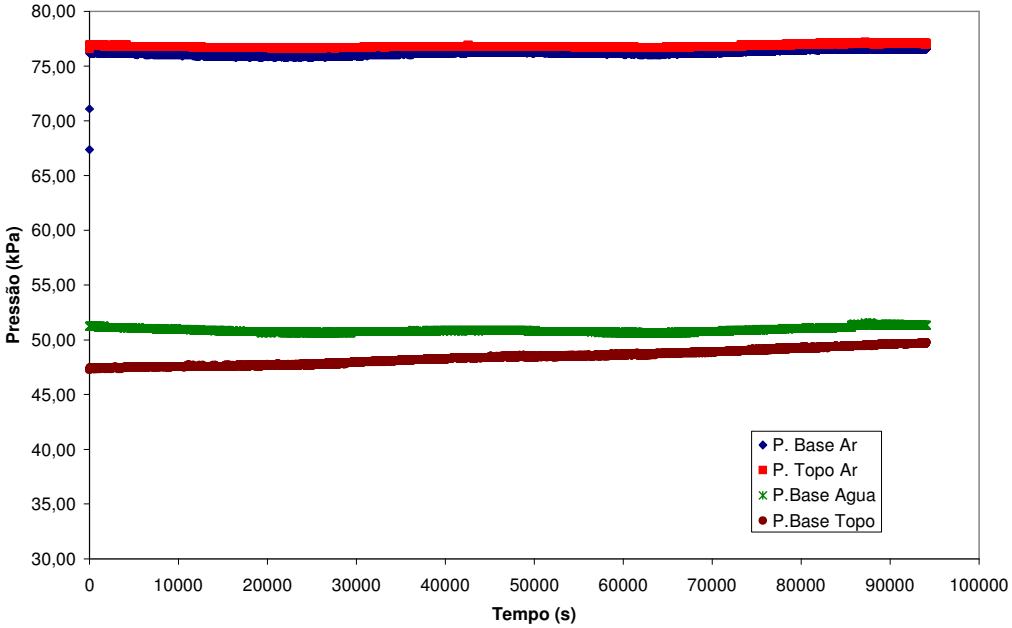

Figura 7.8 – Registro das pressões - Ensaio de Carga Constante – Solo B1 – Layout 1

Na Tabela 7.3 estão resumidos os resultados dos ensaios de permeabilidade para o solo B1. O corpo de prova correspondente ao ensaio 3 apresentou uma fratura sub-vertical em toda a altura da amostra quando foi desmontado o ensaio. Os corpos de provas dos ensaios 5 e 6 foram saturados dentro do permeâmetro antes da execução dos ensaios de permeabilidade, este procedimento foi necessário para conseguir aplicar um valor de sucção da ordem de 20kPa. Como foi dito no Capítulo 5, a intenção era utilizar corpos de prova maiores, da ordem de 6cm, nas amostras de solo residual. Entretanto, problemas de moldagem devido à heterogeneidade do material obrigaram a trabalhar com amostras de 3cm na maioria dos ensaios.

As diferenças de sucção inicial e final na base (Tabela 7.3), nos ensaios 7 e 8, são decorrentes da aplicação da vazão constante, o que produz um aumento na pressão de água na base do corpo de prova enquanto a pressão de água no topo é mantida constante. As pressões de ar no topo e na base são mantidas constantes no decorrer do ensaio, logo a mudança no valor de sucção é só função do valor de vazão aplicado na base.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Tabela 7.3 – Resultados dos Ensaios de Permeabilidade - Solo B1

Ensaio	Altura cp (cm)	No equilíbrio			w_{final} (%)	k (cm/s)
		Vazão (1) (cm^3/s)	Sucção aplicada (2) (kPa)	ΔVolume (cm^3)		
1	3	$4,95x10^{-6}$	60,22	0,179	20,63	$4,63x10^{-9}$
2	3	$2,18x10^{-6}$	76,80	0,193	23,16	$8,39x10^{-9}$
3	3	$2,98x10^{-6}$	72,13	0,167	23,06	$1,27x10^{-8}$
4	3	$1,32x10^{-5}$	37,27	0,064	25,16	$4,37x10^{-9}$
5	6	$3,83x10^{-5}$	26,24	0,235	23,41	$5,70x10^{-7}$
6	6	$1,33x10^{-5}$	25,31	0,291	23,71	$6,54x10^{-7}$
7	2,98	$5,14x10^{-6}$	Inicial Topo=80,41 Base=76,90 Final Topo=80,41 Base=69,46	0,157	22,93	$6,53x10^{-9}$
8	5,85	$2,03x10^{-5}$	Inicial Topo=44,39 Base=44,67 Final Topo=44,39 Base=18,68	0,344	21,43	$1,66x10^{-8}$

(1) Vazão na saída, (2) Diferença das pressões de ar e água aplicadas.

Na Figura 7.9 está mostrada a variação do coeficiente de permeabilidade com a sucção para o Solo B1. Nos ensaios por vazão constante (Ensaios 7 e 8) considerou-se a sucção média igual à média aritmética dos valores no topo e na base do corpo de provas, no final do ensaio. No ensaio 7 mesmo com o gradiente constante, a vazão registrada na saída foi muito menor que a vazão injetada ($2,09x10^{-5} cm^3/s$).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

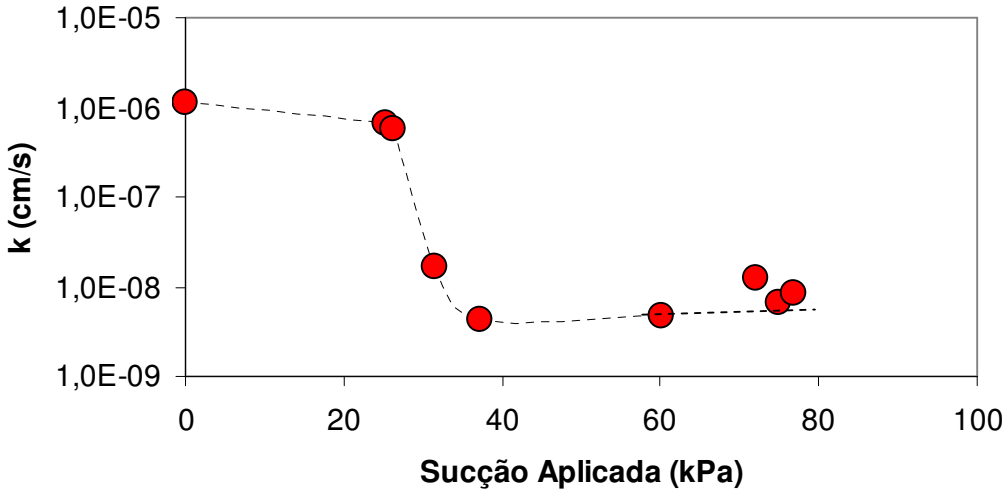

Figura 7.9 – Função de permeabilidade Solo B1

Como nos ensaios é medido o valor de umidade final é possível inferir da curva característica de sucção do material o valor de sucção correspondente. Isto nos permite comparar a diferença entre o valor teoricamente aplicado (pela diferença entre as pressões de água e de ar aplicadas) e o valor realmente atingido no solo (função da umidade final). Pelas características da curva de retenção do solo B1 (Figura 6.11), a variação de umidade com a sucção até os 100kPa é muito pequena, razão pela qual não foi possível obter o valor de sucção correspondente com a umidade final. Optou-se por obter os valores de umidade correspondentes com cada sucção aplicada a partir do modelo de ajuste de van Genutchen (1980), Figura 6.49 (a) e Tabela 6.20 e, compará-los com os valores de umidade obtidos no final do ensaio. Na Tabela 7.4 são apresentados os valores de umidade real no final do ensaio (valor experimental) e o valor resultante do modelo de van Genutchen (1980) de curva característica (valor esperado) para o material B1.

Tabela 7.4 – Diferença entre os valores de w_f real e w da CC - Solo B1

Sucção Aplicada (%)	Valor Experimental wf (%)	Valor Esperado (*) w(%)
60,22	20,63	24,09
76,8	23,16	24,64
72,13	23,06	24,65
37,27	25,16	24,74
26,24	23,41	24,50
25,31	23,71	24,51
74,94	22,93	25,47
31,54	21,43	24,49

(*) da Curva Característica de Sucção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

A diferença entre os valores obtidos ao final do ensaio e os valores inferidos da curva característica de sucção é importante. Para tentar entender a diferença entre estes valores, analisou-se a relação entre os valores em forma gráfica, Figura 7.10. Da Figura pode observar-se que o maior afastamento entre os valores esperados (obtidos da curva característica) e medidos (final do ensaio) se dá nos ensaios por vazão constante. Isto pode estar justificado pela distribuição não linear da sucção dentro do corpo de prova, como o valor utilizado no cálculo da umidade foi a media aritmética dos valores de sucção aplicados no topo e na base, o valor obtido pode estar muito afastado do valor real. Os ensaios de carga constante apresentam uma correspondência melhor com os valores experimentais, o coeficiente R^2 entre os dois valores é de aproximadamente 0,80. Considerando que o solo B1 é um solo residual jovem de rocha heterogênea, a diferença de tamanho dos corpos de prova dos ensaios de curva característica de sucção e dos utilizados nos ensaios de permeabilidade, o valor de R^2 é aceitável.

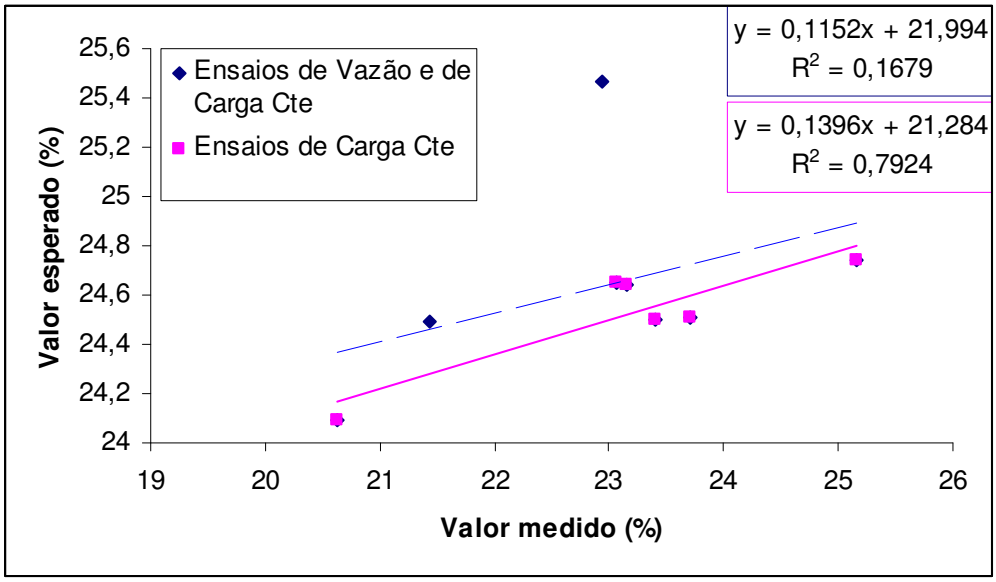

Figura 7.10 – Comparação entre os teores de umidade gravimétricos medidos e esperados.

De maneira similar ao efetuado com os dados de curva característica, aplicaram-se os modelos de ajuste aos valores experimentais de permeabilidade. Na Figura 7.11 está mostrado o ajuste da função de permeabilidade pelo modelo de van Genutchen – Mualem, com os mesmos parâmetros α, n e m da curva característica (α=0,00032; n=3,59; m=0,722, na

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Tabela 6.20) e com um valor de l de 3000 e de l de 1100, procurando o melhor ajuste.

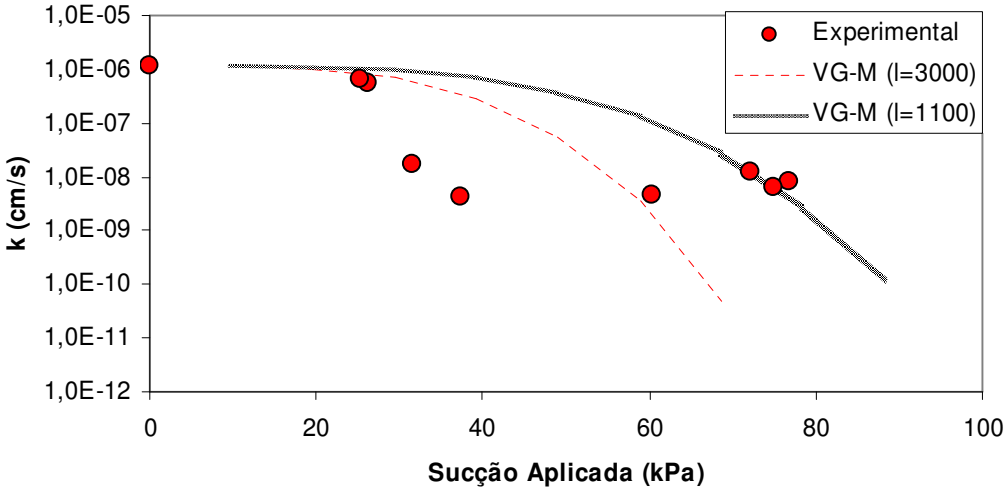

Figura 7.11 – Ajuste da função de permeabilidade pelo Modelo de van Genutchen-Mualem

Da Figura se pode observar que os parâmetros da curva característica não ajustam satisfatoriamente os dados experimentais. Procuraram-se então os melhores parâmetros de ajuste para a função de permeabilidade, independentemente dos parâmetros da curva característica. Este ajuste está mostrado na Figura 7.12. Pode notar-se da Figura que o mesmo desconsidera 50% dos valores experimentais. Os valores dos parâmetros de ajuste foram α= 0,0039; n=11,85; m=0,916 e l=0,3.

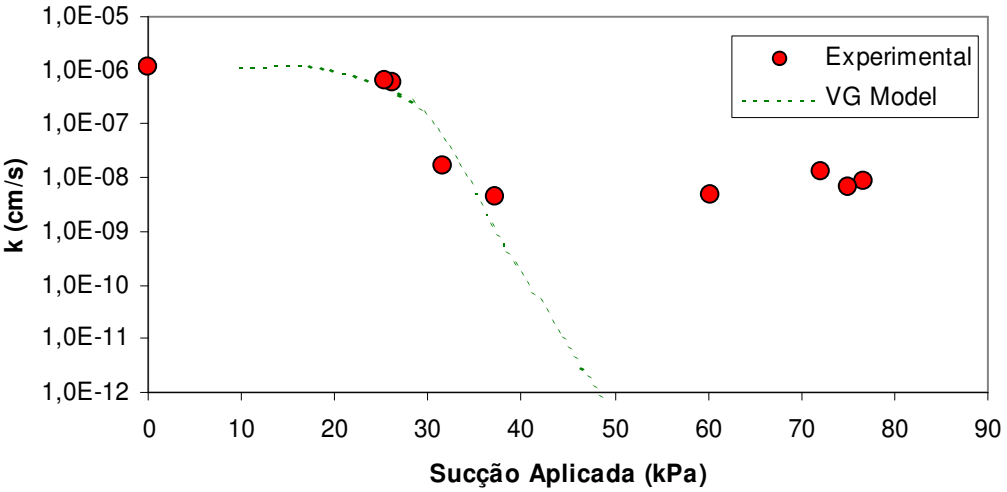

Figura 7.12 – Ajuste dos dados de permeabilidade pelo modelo de van Genutchen – Mualem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

7.4.2
Solo Sedimentar

Os ensaios no solo sedimentar apresentaram o mesmo comportamento do solo residual B1, no que se refere aos tempos de ensaio. A curva resultante também foi produto da execução de ensaios de carga e de vazão constante. Na Tabela 7.5 estão descritas as condições dos ensaios executados e, na Figura 7.13 está mostrada a resposta típica observada nos ensaios neste material. Da mesma maneira que no solo residual B1, as características dos corpos de prova e os gráficos específicos correspondentes a cada ensaio estão apresentados no Anexo 3.

Tabela 7.5 – Resumo dos Ensaios de Permeabilidade - Solo Sedimentar

Metodologia	Ensaio N	Altura cp (cm)	Pressão de água (kPa)		Pressão de ar (kPa)		Tensão Normal liquida (kPa)	Tempo de ensaio (h)
			Topo	Base	Topo	Base		
Carga Constante	1	2,99	30,00	40,00	95,00	95,00	154,0	323,0
	2	6,20	15,80	17,20	95,60	97,00	154,0	482,4
	3	4,00	59,70	70,00	95,00	95,00	154,0	240,5
Vazão Cte			Equalização					
	4	2,97	30,00	40,00	95,0	95,0	154,0	288,7
	5	6,01	19,36	25,81	40,01	47,82	154,0	425,0

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

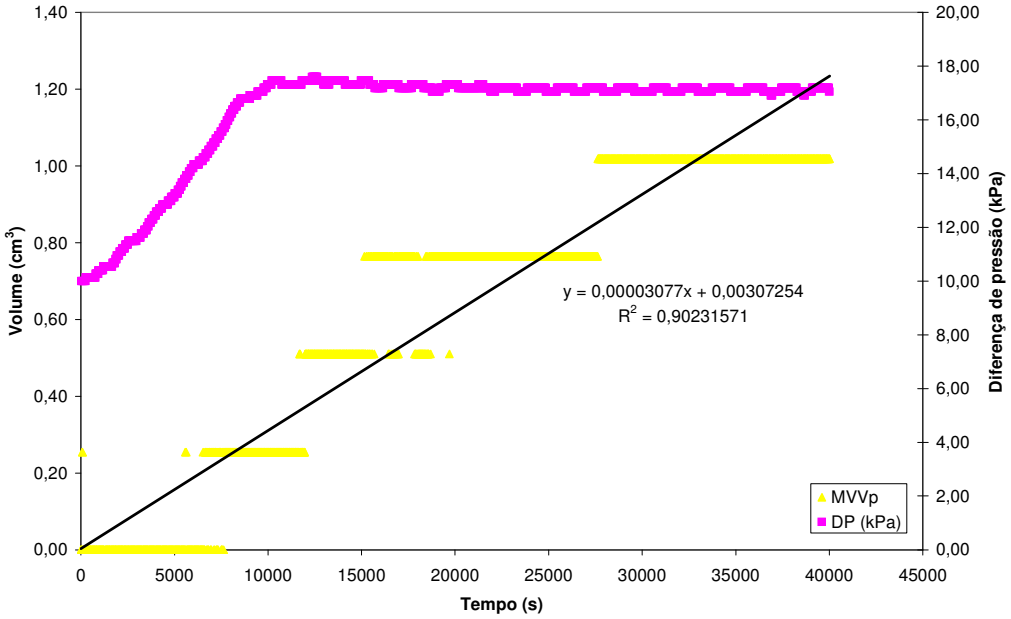

Figura 7.13 – Ensaio de Vazão Constante – Solo Sedimentar – Layout 2

Também neste material foram perdidos dois ensaios por vazamentos no sistema de aplicação de pressão (bomba), o que reforça a hipóteses de algum problema na retificação do embolo da seringa. Problema que só se apresenta nos ensaios de longa duração, já que não foi detectado nas etapas de calibração. Um terceiro ensaio apresentou um aumento excessivo da pressão na base em função da vazão aplicada (Figura 7.14), ficando a pressão de água gerada na base maior que a pressão de ar aplicada.

O resumo dos resultados dos ensaios executados está apresentado na Tabela 7.6.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

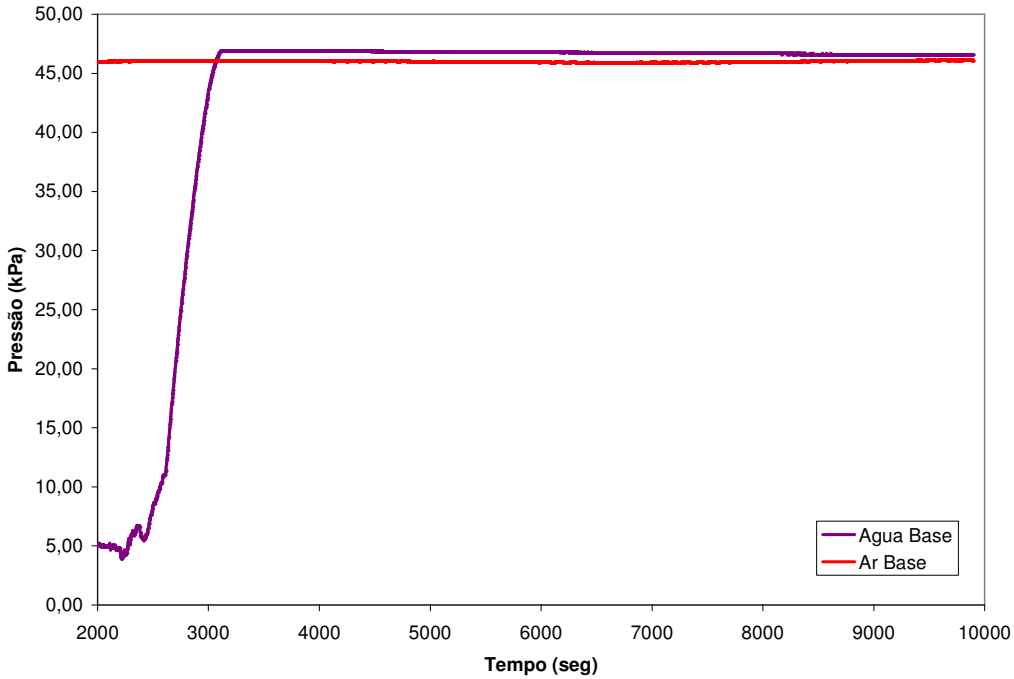

Figura 7.14 – Geração de pressão excessiva na base – Ensaio de vazão constante

Tabela 7.6 – Resultados dos Ensaios de Permeabilidade - Solo Sedimentar

Ensaio N	Altura cp (cm)	No equilíbrio			w_{final} (%)	Sucção CC[(2)]	k (cm/s)
		Vazão (cm^3/s)	Sucção aplicada [(1)] (kPa)	ΔVolume (cm^3)			
1	2,99	$5,90x10^{-6}$	60,00	2,07	5,31	51	$9,13x10^{-9}$
2	6,20	$6,45x10^{-7}$	79,80	1,23	3,82	95	$7,15x10^{-9}$
3	4,00	$9,37x10^{-5}$	30,15	0,31	6,37	29	$1,22x10^{-7}$
4	2,97	$2,73x10^{-5}$	Inicial Topo=65,11 Base=55,20 Final Topo=64,59 Base=47,81	1,75	6,08	36	$1,51x10^{-8}$
5	6,01	$2,51x10^{-5}$	Inicial Topo=20,65 Base=22,01 Final Topo=20,76 Base=3,57	3,68	6,52	25	$2,30x10^{-8}$

(1) Diferença das pressões de ar e água aplicadas, (2) inferida da curva característica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

As diferenças de sucção nos ensaios 4 e 5, na Tabela 7.6, são conseqüência do excesso de pressão gerado na base pela injeção da vazão constante. Como a pressão de água do topo e as pressões de ar são mantidas constantes durante o ensaio, existe um gradiente de sucção na secção vertical do corpo de provas.

Neste material ainda foram executados mais três ensaios de carga constante com sucções menores que 20kPa que apresentaram valores de permeabilidade menores, em duas ordens de grandeza, ao material saturado. Como o valor de entrada de ar do material é de aproximadamente 20kPa, esse comportamento foi considerado função da permeabilidade dos discos porosos utilizados e não o comportamento natural do material, pelo que os ensaios foram descartados.

Neste material foi possível obter o valor da sucção inferido da curva característica a partir do valor de umidade no final do ensaio (Sucção CC na Tabela 7.6). Existe uma correspondência razoável entre os valores aplicados no equipamento e os valores apresentados pelo material no final do ensaio. Na Figura 7.15 esta apresentada a relação entre os dois valores. Como no caso do solo B1 observa-se que os ensaios de vazão constante encontram-se mais afastados em relação ao valor esperado que os valores correspondentes aos ensaios de carga constante. A explicação provável para este fenômeno é a distribuição não linear da sucção na altura do corpo de provas.

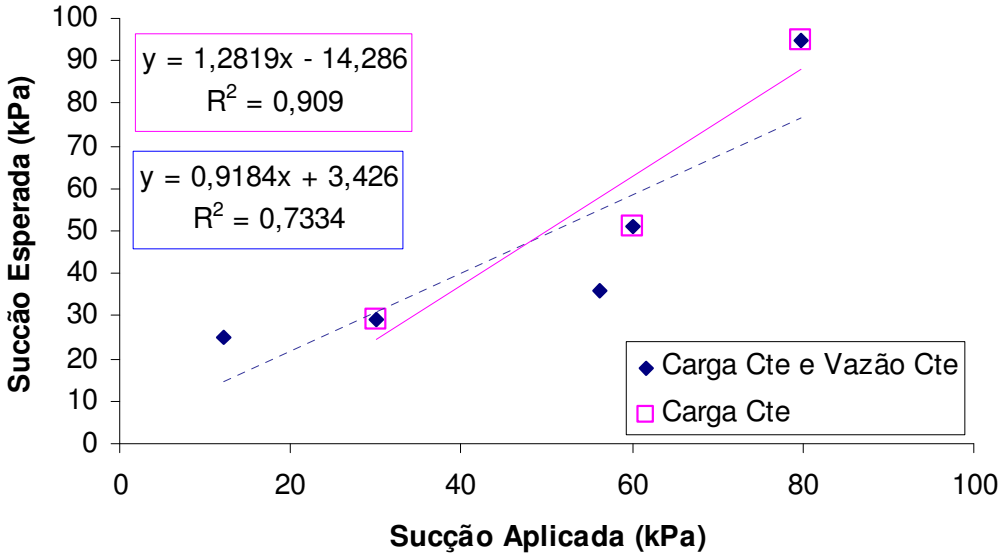

Figura 7.15 – Comparação entre os valores de sucção aplicados e os valores de sucção inferidos da curva característica de sucção para o solo Sedimentar do Maranhão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Nas Figuras 7.16 e 7.17 são apresentadas as funções de permeabilidade considerando a sucção aplicada e a sucção inferida da curva característica de sucção em função da umidade final, respectivamente.

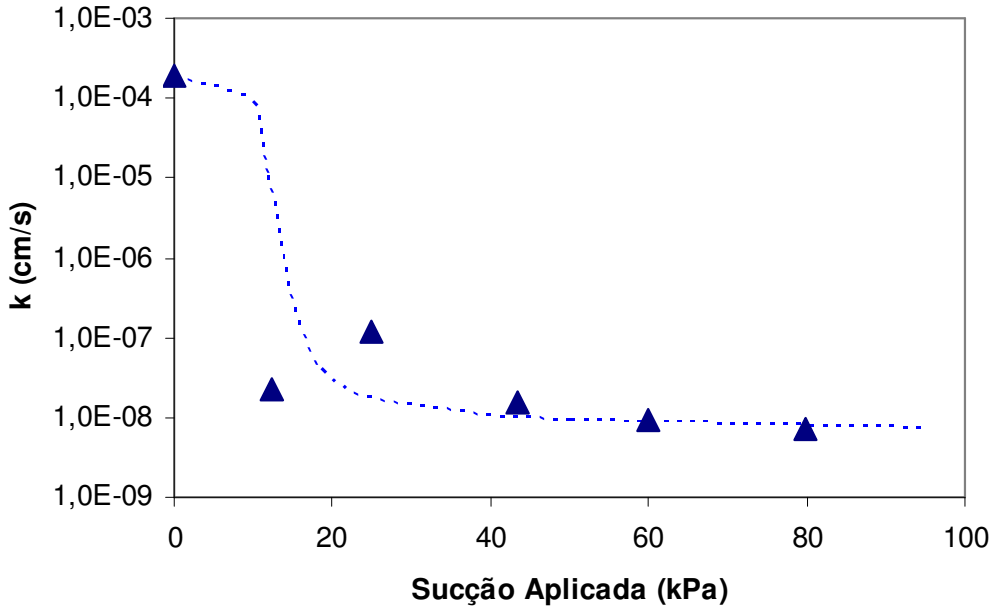

Figura 7.16 – Função de permeabilidade Solo Sedimentar – Sucção aplicada

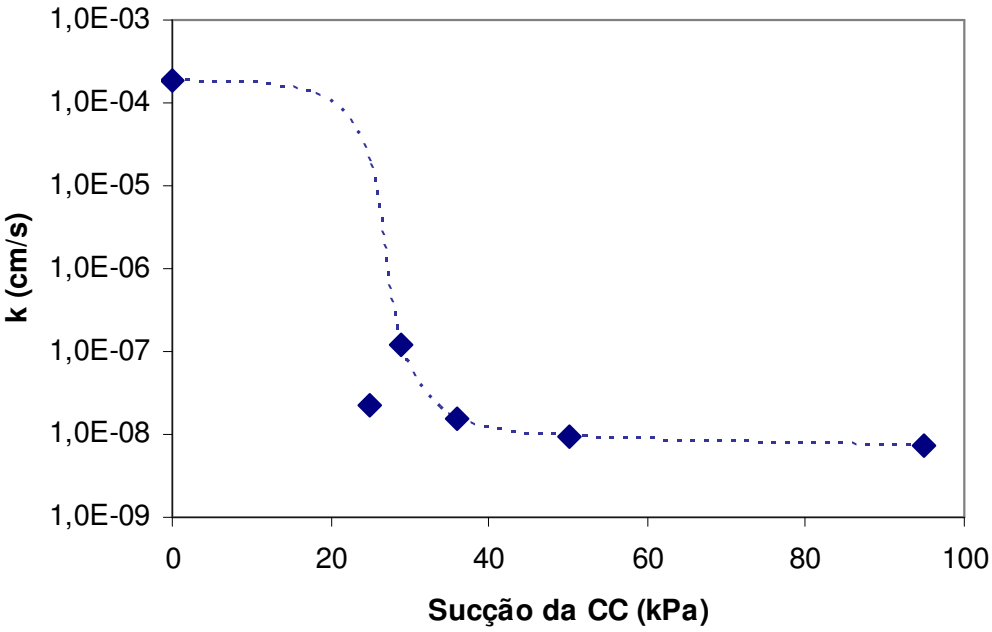

Figura 7.17 – Função de permeabilidade Solo Sedimentar – Sucção inferida da Curva Característica.

De maneira semelhante ao executado com os dados do solo residual B1, a função de permeabilidade em função da sucção inferida da curva caracteristica

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

foi ajustada pelo modelo de van Genutchten – Mualem, utilizando os parâmetros de ajuste obtidos para a curva de retenção (Tabela 6.20). O resultado deste ajuste está mostrado na Figura 7.18 (Curva VGModel), pode observar-se que os parâmetros da curva característica não ajustam satisfatoriamente os dados experimentais. Procuraram-se então os parâmetros que fornecessem o melhor ajuste para a função de permeabilidade, independentemente dos parâmetros da curva de retenção, mas não foi obtido um ajuste aceitável para qualquer valor de l positivo. Esta procura foi feita por sucessivas iterações.

Só foi possível obter um ajuste razoável dos dados experimentais quando se utiliza a equação de van Genutchen-Mualem como uma simples equação matemática, esquecendo o significado físico dos parâmetros de ajuste. Assim, obteve-se o ajuste utilizando um valor de l negativo, correspondente com a curva VGModel-k na Figura 7.18.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

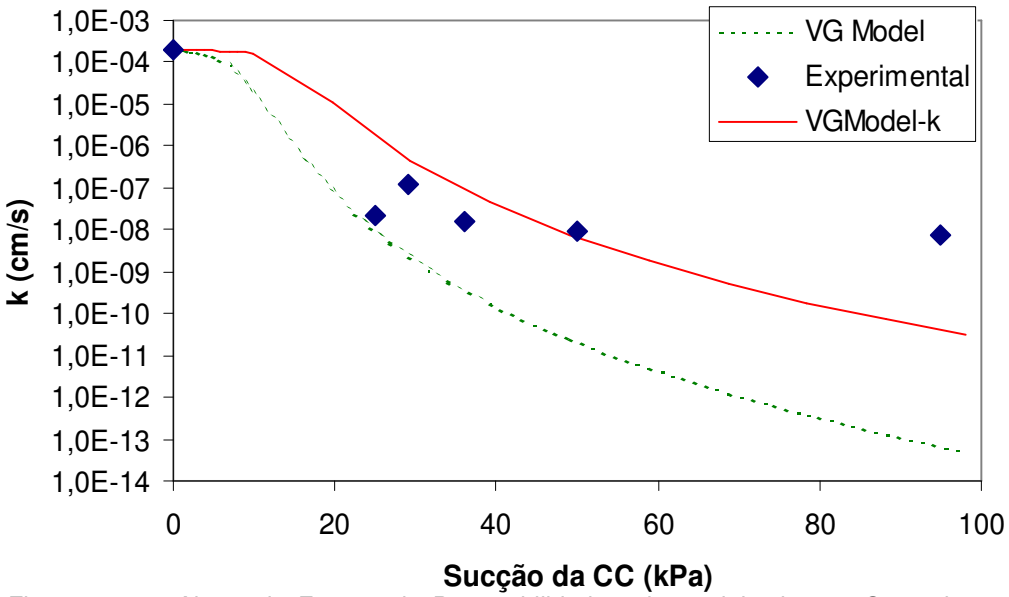

Figura 7.18 – Ajuste da Função de Permeabilidade pelo modelo de van Genutchen-Mualem

Nenhum dos ajustes utilizando o modelo de van Genutchen-Mualem foi aceitável para 100% dos valores experimentais. Isto levou a testar mais dois modelos de ajuste, o modelo de Brooks & Corey (1964) apresentado na Tabela 3.2 (Capítulo 3), e que segundo Gerscovich e Guedes (2004) apresenta bons resultados para os solos brasileiros; e um modelo do tipo macroscópico (Item 3.5.2.2). A escolha do modelo macroscópico foi devida à forma da equação matemática que rege este modelo, compatível com a forma de variação apresentada pelos dados experimentais.

O modelo macroscópico utiliza o grau de saturação efetivo *Se*= (S-Sr)/(1-Sr), com S=grau de saturação e Sr=grau de saturação residual. Os valores de *Se* foram calculados utilizando o modelo de van Genutchen (1980) para a curva característica do solo (Tabela 6.20).

Os ajustes estão apresentados na Figura 7.19. No caso do modelo de Brooks and Corey (1964) o valor de n = –2,4 e, no modelo macroscópico o valor de δ=1,6.

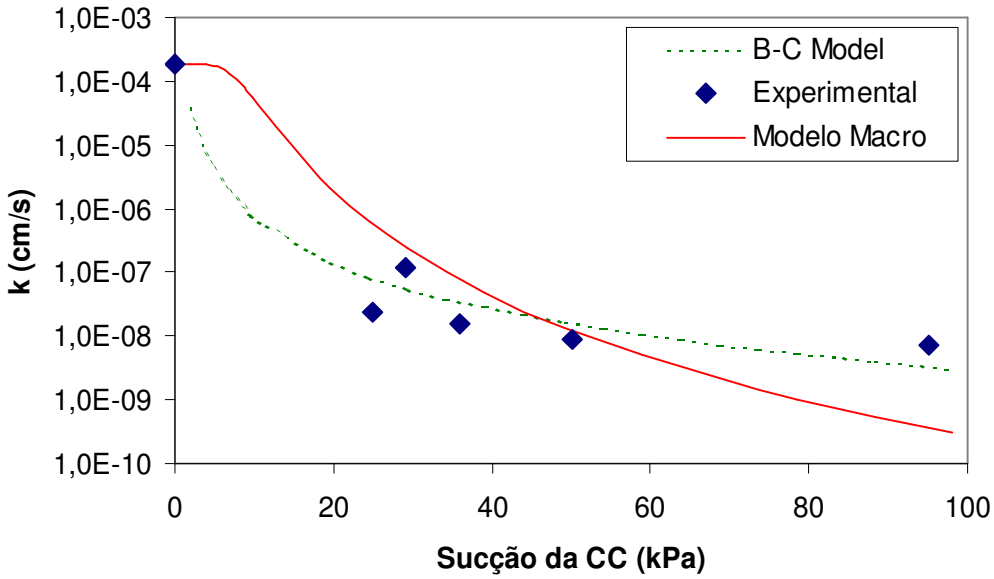

Figura 7.19 – Ajuste pelo modelo de Brooks & Corey (B-C Model) e pelo modelo macroscópico

Embora o ajuste não seja aceitável, o modelo macroscópico representa melhor a forma de variação da função de permeabilidade quando comparado com a resposta do modelo de Brooks e Corey (1964) para os mesmos dados. O ajuste de Brooks e Corey apresenta uma diminuição muito brusca (duas ordens de grandeza) para o coeficiente de permeabilidade para valores muito menores que o valor de entrada de ar do material, em torno de 20kPa, o que não parece ajustar-se ao fenômeno real. O modelo macroscópico apresenta uma redução mais gradual do coeficiente de permeabilidade com a sucção.

A partir da evidência que o modelo macroscópico pode representar melhor a forma da função de permeabilidade, procurou-se uma nova função que respeitasse a forma geral do modelo macroscópico, mas com um valor de limite inferior relacionado com o patamar presente na função de permeabilidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

experimental. Este limite inferior foi denominado k_R, e a nova função responde à seguinte equação:

$$k(\psi) = k_s \bullet Se^{\delta} + k_R \qquad \textbf{Equação 7-4}$$

com ks = permeabilidade saturada, Se=grau de saturação efetivo e δ parâmetro de ajuste do modelo.

Da mesma maneira que o efetuado no ajuste para o modelo macroscópico (Figura 7.19), o valor de Se é obtido do modelo de van Genutchen (1980) para a curva característica com os dados apresentados na Tabela 6.20. A escolha de utilizar os parâmetros do modelo de van Genutchen (1980) para a curva característica de sucção do material foi devido ao bom ajuste que este modelo apresentou para os dados de retenção de água, ou seja, ele consegue descrever bem a variação do grau de saturação, em conseqüência do grau de saturação efetivo, com a sucção.

Os ajustes obtidos com esta nova função, aplicados tanto ao solo sedimentar quanto ao residual, estão apresentados nas Figuras 7.20 e 7.21.

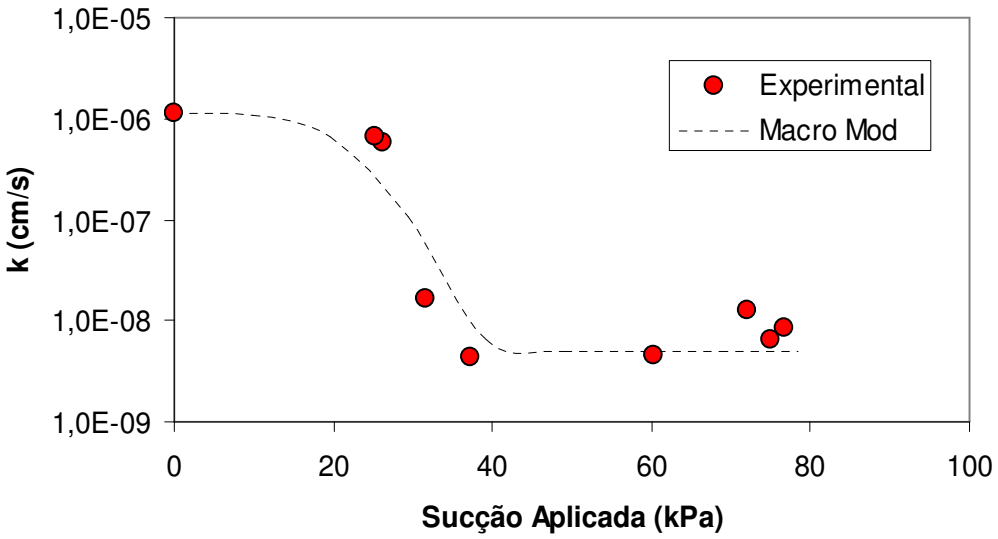

Figura 7.20 – Ajuste da função de permeabilidade para o solo residual B1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

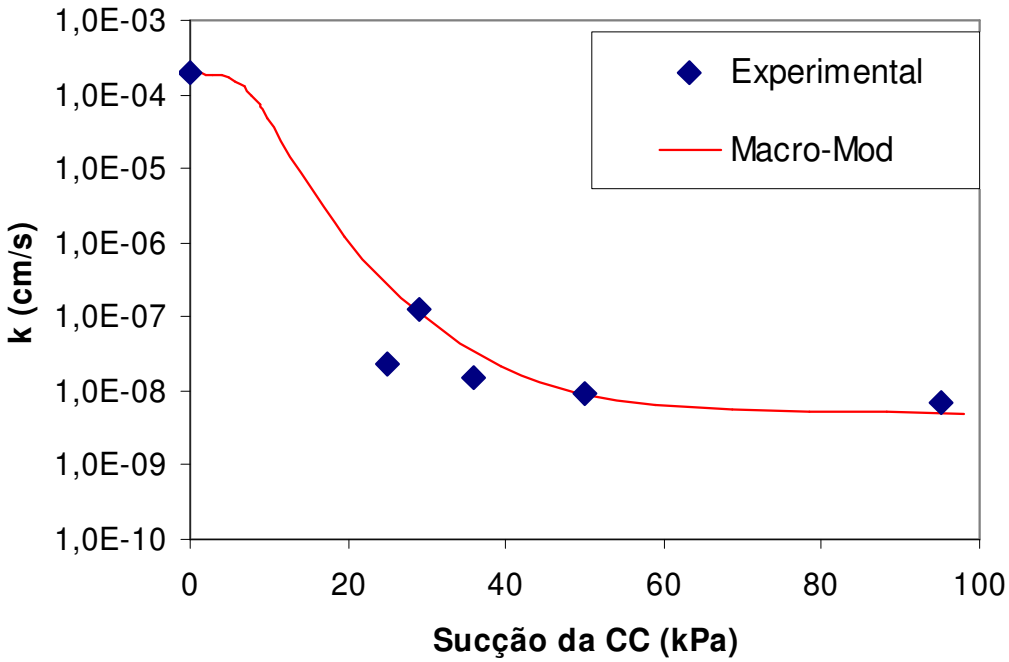

Figura 7.21 – Ajuste da função de permeabilidade para o solo sedimentar do Maranhão

Das Figuras pode-se concluir que esta nova função permite obter um ajuste mais consistente com os dados experimentais para ambos os solos, impondo um valor limite inferior e aproveitando os dados de ajuste da curva característica de sucção.

7.5
Comentários Finais

As funções de permeabilidade obtidas resultaram da combinação de duas técnicas de ensaio: vazão constante e carga constante. A maior limitação dos ensaios de vazão constante foi a vazão mínima aplicada pela bomba de vazão constante, na ordem de 10^{-5} cm^3/s, que gerou excessos de pressão elevados (Tabelas 7.3 e 7.6), provocando um gradiente de sucção importante nas amostras. Valores menores de vazão inviabilizam os ensaios em função do tempo necessário para atingir o regime permanente. Nestes ensaios adotou-se uma distribuição linear dentro da amostra, considerando a sucção do ensaio igual à média aritmética dos valores no topo e na base. Os resultados das simulações numéricas mostraram que a distribuição apresenta uma forte não-linearidade. A comparação entre os valores de umidade e sucção esperados com os valores experimentais (Figuras 7.10 e 7.15) também mostraram que a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

hipóteses de distribuição linear pode fornecer valores muito afastados dos reais. Pelo que neste tipo de ensaio seria necessário ter instrumentação interna que permita conhecer o padrão de distribuição de sucção real no interior do corpo de prova para minimizar os erros associados á técnica de ensaio.

Os ensaios por carga constante são relativamente mais demorados, mas apresentaram uma distribuição de sucção linear, o que diminui o erro associado à escolha do valor de sucção como a média aritmética dos valores aplicados na base e no topo. Isto foi mostrado nos resultados das simulações numéricas e também foi confirmado pela comparação entre os valores esperados e medidos de sucção e umidade nos ensaios executados (Figuras 7.10 e 7.15). A técnica permite também a possibilidade de aplicar gradientes pequenos, o que resulta numa distribuição de sucção mais uniforme no interior da amostra, como está mostrado nos resultados das simulações numéricas.

O tempo necessário para a execução dos ensaios é função principalmente da permeabilidade dos discos porosos, independentemente da técnica de ensaio. A permeabilidade dos discos também limita o valor mínimo de permeabilidade que pode ser medido nos ensaios de carga constante.

No presente trabalho foram obtidas as funções de permeabilidade para dois materiais, um solo arenoso denominado Solo Sedimentar e um solo residual denominado Solo B1. O permeâmetro apresentou um funcionamento satisfatório tanto nos ensaios de carga constante como de vazão constante. As modificações introduzidas permitiram uma precisão maior na execução dos ensaios. Delas, o sistema de medição da variação de volume funcionou corretamente.

È importante notar que as variações de temperatura registradas, e.g. calibração do sistema de medição de variação de volume, são importante mesmo numa sala climatizada. Isto indica que é fundamental monitorar as variações de temperatura durante a execução de ensaios de longa duração como são os ensaios executados em condições não saturadas, para a aplicação de eventuais correções nos dados registrados.

Nenhuma das funções de permeabilidade apresentou um bom ajuste com o modelo de van Genutchen-Mualem. As duas curvas apresentaram forma de S com valores de entrada de ar menores que os das curvas características correspondentes e uma variação da permeabilidade com a sucção (valor de m no ajuste de van Genutchen) muito maior que a esperada pela forma da curva característica. Isto pode indicar a existência de parâmetros de ajuste diferentes para a curva característica de sucção e para a função de permeabilidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA

Considerando a forma das curvas experimentais, apresentou-se uma nova função de ajuste considerando que existe um valor mínimo de permeabilidade para os materiais e aproveitando os parâmetros de ajuste da curva característica de sucção no cálculo do grau de saturação efetivo (*Se*). Salienta-se que esta função é válida para os dados apresentados e, até um valor de sucção limite de 100kPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410746/CA