

## 7

### **Apresentação e Análise dos Resultados**

Este capítulo apresenta os resultados e as análises dos ensaios de laboratório realizados no solo coluvionar argiloso – Campo Experimental, e no solo residual arenoso – Cidade dos Meninos, ambos predominantemente caulíníticos.

O programa experimental constou de ensaios de condutividade hidráulica saturada, condutividade térmica / calor específico do solo, curvas características de sucção, ensaios de condutividade hidráulica saturada com temperatura controlada e ensaios de deformabilidade com temperatura controlada.

Conforme mencionado anteriormente os procedimentos iniciais adotados foram os mesmos para todos os ensaios realizados. Corpos de prova com 6 cm de altura e 10,14 cm de diâmetro compactados de acordo com o item 5.2.1. Os equipamentos e as metodologias empregadas em cada ensaio foram apresentados no Capítulo 6.

#### **7.1**

##### **Condutividade Hidráulica Saturada**

A metodologia para a execução dos ensaios de condutividade hidráulica saturada está descrita no item 6.1. Foram realizados sete ensaios de condutividade hidráulica saturada com corpos de prova submetidos a diferentes gradientes de temperatura, para o solo do Campo Experimental, e quatro para o solo da Cidade dos Meninos.

Os ensaios aqui apresentados foram realizados com gradientes hidráulicos entre 10 e 11. Para se trabalhar com gradientes entre 10 e 11 a diferença de pressão entre o topo e a base é de 7kPa. Valores mais baixos desta diferença de pressão não são aconselháveis de se medir nos transdutores devido a precisão dos mesmos. Tão pouco deve-se utilizar gradientes maiores, pois este poderá causar danos aos corpos de prova, podendo ocasionar seu deslocamento ou indução de fissuramentos hidráulicos. Trabalhou-se com tensões efetivas baixas da ordem de 15 kPa, simulando-se o solo superficial.

Os dados iniciais de confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios estão apresentados na Tabela 15 (Campo Experimental) e Tabela 16 (Cidade dos Meninos).

Tabela 15 – Dados após compactação dos corpos de prova - Campo Experimental

CP	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	S (%)
01	16,92	13,79	22,75	0,95	64,26
02	17,38	14,23	22,09	0,95	62,03
03	17,05	13,78	23,69	0,96	66,88
04	16,86	13,79	22,27	0,95	62,89
05	16,78	13,83	21,27	0,96	60,49
06	17,01	13,77	23,55	0,93	66,38
07	16,91	13,94	21,32	0,95	61,60

Tabela 16 – Dados após compactação dos corpos de prova - Cidade dos Meninos

CP	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	S (%)
01	19,25	16,28	18,23	0,60	79,41
02	19,16	16,18	18,45	0,61	78,98
03	18,98	16,09	17,98	0,62	75,87
04	19,37	16,32	18,67	0,59	81,87

Após a compactação, os corpos de prova eram secos ao ar durante sete dias, e, então submetidos a diferentes temperaturas na mufla durante o período de 8 horas. Nas Tabelas 17 e 18 estão apresentados os dados dos corpos de prova no início do ensaio e os valores das condutividades hidráulicas obtidas, ensaiando-se os corpos de prova após aquecimento em mufla, para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos respectivamente.

Das Tabelas 17 e 18 observa-se que o índice de vazios após a secagem ao ar se manteve praticamente constante, mesmo quando submetido a diferentes gradientes de temperatura em Mufla. Para o solo do Campo Experimental apresentou o valor médio de 0,88 enquanto que para o solo da Cidade dos Meninos apresentou o valor médio de 0,58.

Tabela 17 – Dados iniciais dos Corpos de Prova ensaiados – Campo Experimental

Ensaio	Temp. (°C)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	Parâmetro B	Condutividade Hidráulica(m/s)
01	22	14,61	14,32	1,96	0,88	0,99	$6,15 \times 10^{-7}$
02	50	14,46	14,17	1,99	0,90	0,97	$1,73 \times 10^{-6}$
03	100	14,77	14,48	2,02	0,86	0,99	$2,31 \times 10^{-6}$
04	150	14,76	14,48	1,94	0,86	0,98	$4,08 \times 10^{-6}$
05	200	14,45	14,17	1,92	0,90	0,98	$4,74 \times 10^{-6}$
06	250	14,45	14,17	1,92	0,90	0,97	$6,01 \times 10^{-6}$
07	300	14,75	14,48	1,89	0,86	0,99	$8,56 \times 10^{-6}$

Tabela 18 – Dados iniciais de cada corpo de prova – Cidade dos Meninos

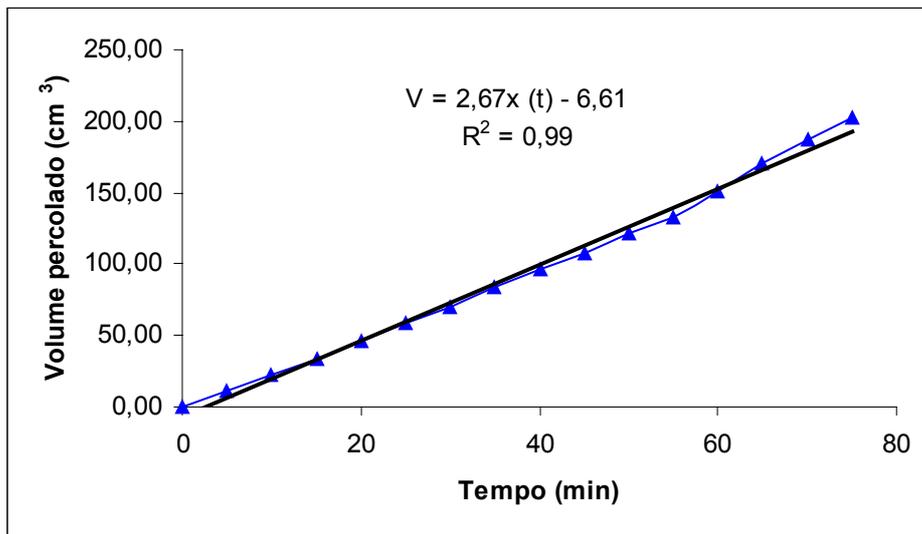
Ensaio	Temp. (°C)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	Parâmetro B	Condutividade Hidráulica(m/s)
01	22	16,80	16,46	2,12	0,58	0,99	$8,11 \times 10^{-7}$
02	100	16,79	16,46	2,01	0,58	1,00	$3,00 \times 10^{-6}$
03	200	16,68	16,35	1,99	0,59	0,98	$4,03 \times 10^{-6}$
04	300	16,88	16,56	1,94	0,57	0,99	$6,95 \times 10^{-6}$

A Figura 35 mostra as curvas de variação de volume percolado, do gradiente hidráulico e da condutividade hidráulica com o tempo, tomando como exemplo o ensaio à temperatura ambiente para o solo do Campo Experimental. Da curva de volume percolado com o tempo retira-se a vazão, equação apresentada na Figura 35(a). Pode-se notar que o gradiente hidráulico e a condutividade hidráulica se mantêm praticamente constante ao longo do ensaio, conforme ilustram as Figuras 35(b) e 35(c). As curvas para os demais ensaios se encontram no Apêndice B.

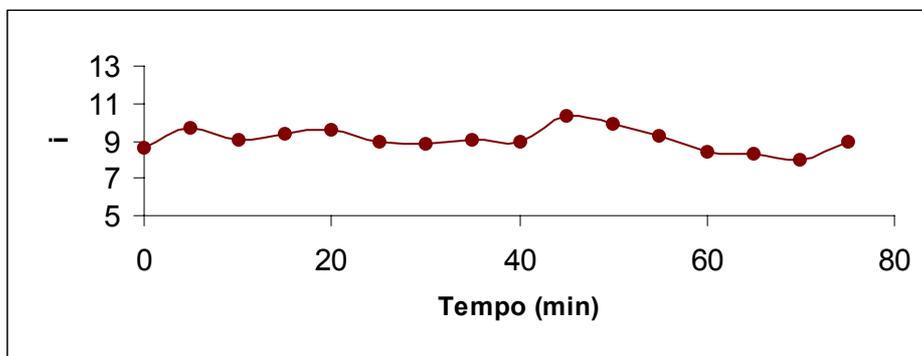
A variação da condutividade hidráulica está plotada na Figura 36. Nesta mesma Figura é apresentada a equação linear que melhor representa os padrões de comportamento das condutividades hidráulicas com a temperatura.

Através da Figura 36 observa-se que as condutividades hidráulicas variaram linearmente com a temperatura. Para o solo do Campo Experimental a condutividade hidráulica apresentou uma variação da ordem de 14% no seu valor quando comparados os coeficientes de condutividade hidráulica na temperatura ambiente e aquecido a 300°C. Esta variação foi menor para o solo da Cidade dos Meninos, da ordem de 8%. É interessante ressaltar que ambos os solos

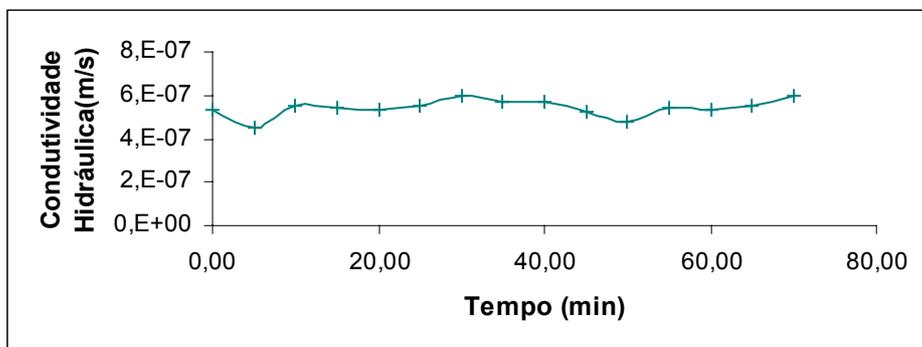
apresentaram o mesmo padrão de comportamento. Essas diferenças observadas nas condutividades hidráulicas com a temperatura podem parecer pequenas quando comparadas em índices percentuais, mas a variação da vazão para corpos de prova que foram submetidos a gradientes de temperatura é bastante significativa, conforme pode-se observar no Apêndice B.



(a)



(b)



(c)

Figura 35 – Ensaio de condutividade hidráulica da amostra a temperatura ambiente para o solo do Campo Experimental: (a) variação de volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo.

Taylor (1948) fez uma associação do fluxo de um fluido viscoso através do solo com a percolação de água através de um conjunto de tubos capilares, correlacionando o coeficiente de condutividade hidráulica (k) da seguinte maneira:

$$k = D_s^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot C \tag{74}$$

onde: k – coeficiente de condutividade hidráulica de Darcy;  $D_s$  - diâmetro médio dos grãos;  $\gamma$  - peso específico do permeante;  $\mu$  - viscosidade do permeante; e – índice de vazios da amostra; C – fator de forma.

De acordo com a equação 74 percebe-se que a condutividade hidráulica é afetada pelas características do permeante ( $\gamma$  e  $\mu$ ) e do solo ( $D_s$ , e, C).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9924939/CB

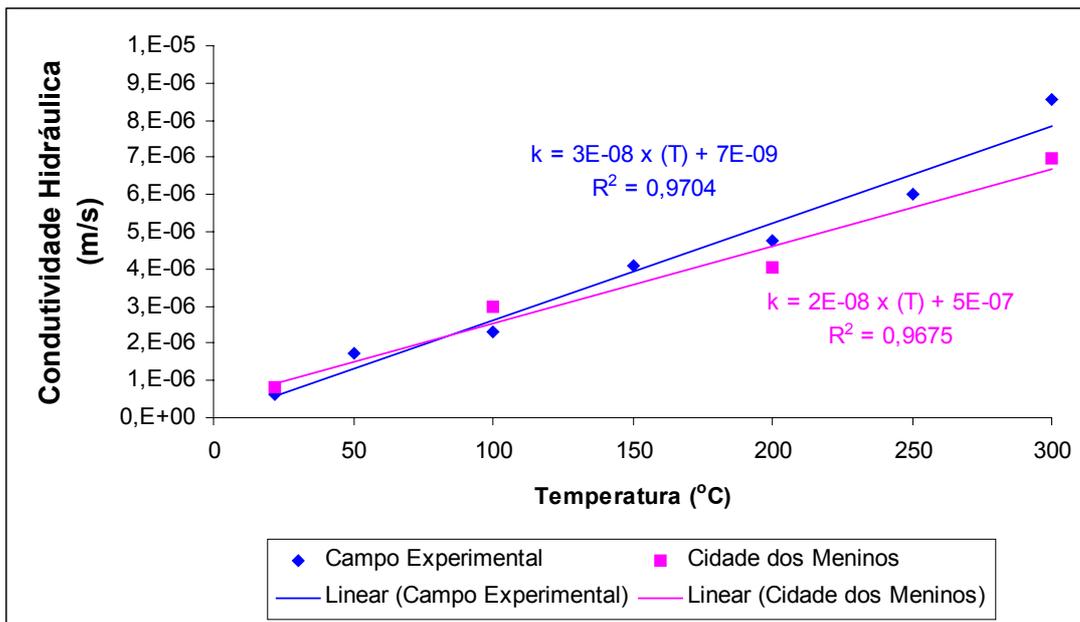


Figura 36 – Variação da condutividade hidráulica para corpos de prova submetidos a gradientes de temperatura em Mufla e ensaiados a temperatura ambiente.

Através dos resultados, mostrados na Figura 36, pode-se dizer que a condutividade hidráulica variou quando os corpos de prova secos ao ar foram submetidos a diferentes gradientes de temperatura, mesmo quando o fluido permeante que estava sendo usado para o ensaio foi mantido em temperatura constante. Levando-se em consideração a equação 74 e observando-se que  $D_s$  é o

mesmo para todos os corpos de prova compactados e que o índice de vazios é praticamente o mesmo, conforme mostram as Tabela 17 e 18, o único parâmetro que se altera é o fator C, que está ligado a estrutura do solo. Os resultados experimentais mostraram que a temperatura modifica a forma dos vazios se interconectarem, provavelmente com o aparecimento de microfissuramentos induzidos pela temperatura.

Fang (1994) já afirmava que pode acontecer o fissuramento térmico provocado por variações de temperatura. Segundo o autor, tensões térmicas se desenvolveriam quando um material é aquecido e esfriado. No caso dos corpos de prova em questão, não se notou nenhum fissuramento aparente, acreditando-se que o aquecimento poderia ter induzido a formação de microfissuras no interior da massa do corpo de prova, refletindo assim neste aumento da condutividade hidráulica do mesmo.

Towhata et al. (1993 b) fizeram um estudo no aquecimento de argilas para examinar o possível efeito da temperatura nas suas propriedades microscópicas, através de uso de microscópio eletrônico (SEM). Os autores não observaram em suas análises mudanças aparentes nas argilas. O efeito de temperatura não foi avaliado na estrutura de um corpo de prova, pois o estudo foi realizado para amostras deformadas aquecidas (até 200°C) e, depois, sim, umedecidas e consolidadas. Provavelmente por isso, os autores não encontraram diferenças devido ao aquecimento.

Para elucidar esta hipótese, empregou-se um microscópio eletrônico para analisar a variação da microestrutura do solo quando submetido a gradientes de temperatura. Foram confeccionadas lâminas que permitissem avaliar os extremos de variação: corpos de prova de solo que não foram submetidos a nenhum acréscimo de temperatura e corpos de prova de solo submetida a 300°C, tanto para o solo do Campo Experimental como para o solo da Cidade dos Meninos. A Figura 37 apresenta fotografias, ampliadas em 25 e 100 vezes, dos solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos para corpos de prova que não foram submetidos a aquecimento e para corpos de prova aquecidos a 300°C. Conforme observado com o auxílio do microscópio, o aquecimento realmente provocou a ocorrência de microfissuras no interior do solo, que provavelmente se refletiram no seu aumento de condutividade hidráulica.

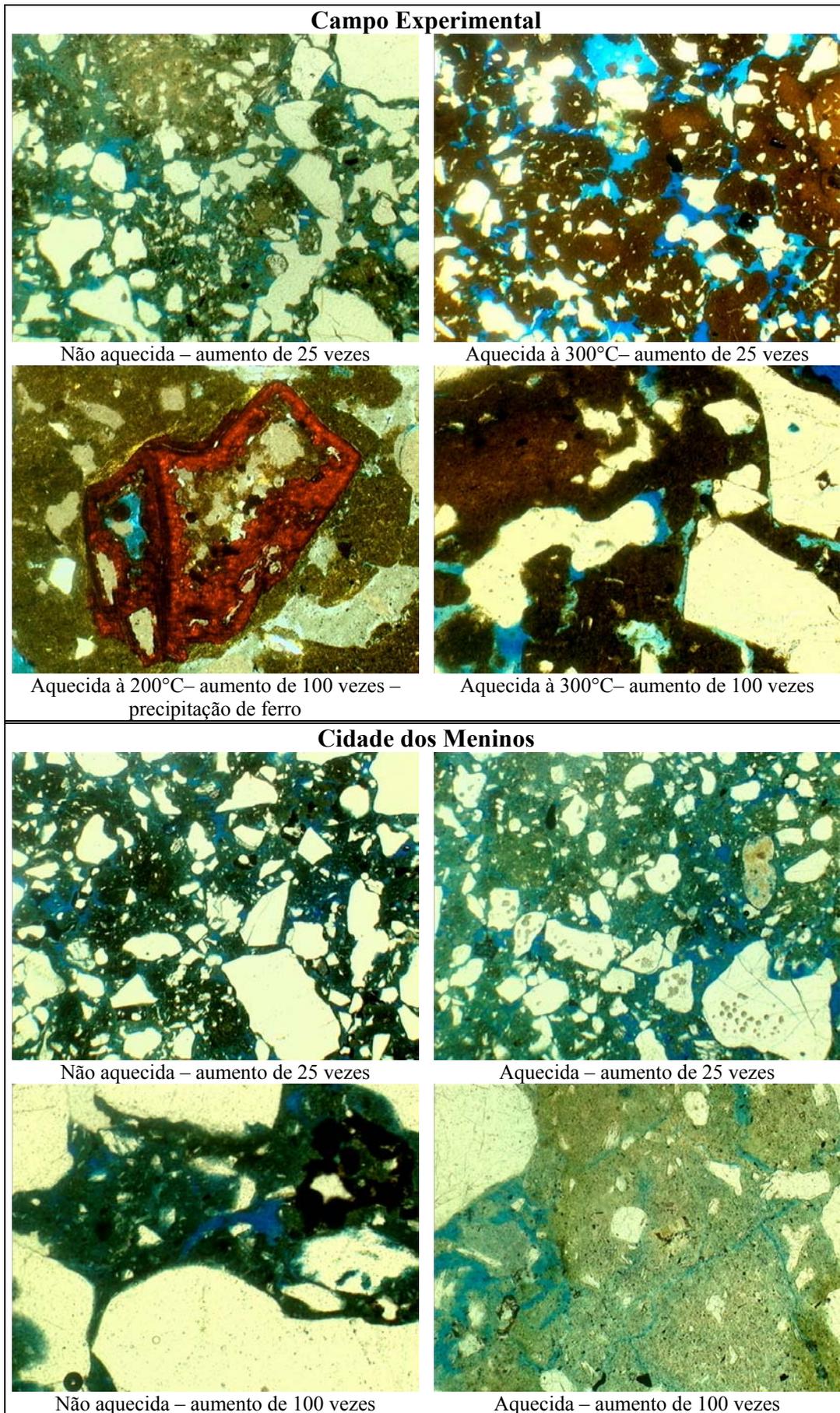


Figura 37 – Imagens das lâminas com microscópio eletrônico

Para o solo do Campo Experimental a primeira mudança a ser observada nas fotografias das amostras submetidas ao aquecimento, é na mudança de coloração, sendo também nítida a compressão/contração no contato solo fino – grãos de quartzo, ou solo-vazios. Já as fotografias do material natural sem aquecimento apresentaram uma estrutura dispersa. Pode-se notar um aumento na interconexão dos vazios, indicado pelo grande quantidade de espaços preenchidos de azul interconectados, indicando haver microfissuramento. A lâmina do solo aquecido a 200°C mostra uma precipitação de ferro com o aumento da temperatura, vindo a confirmar as hipóteses feitas no Capítulo 5. Realmente as alterações nos limites e na granulometria do solo estão ligadas a precipitação de ferro com o aumento de temperatura, pois o ferro torna-se um elemento cimentante e bloqueador das posições de cátions trocáveis como elemento não hidratável.

As lâminas do solo da Cidade dos Meninos, apresentam uma amostra mais arenosa do que as do Campo Experimental, com mais grãos de quartzo. Com o aumento de 25 vezes é discreta a diferença entre as corpos de prova aquecidos e não aquecidos, embora exista um pequeno aumento na interconexão dos vazios, observado pelos espaços ocupados pela coloração azul. Agora, com a ampliação de 100 vezes é possível a identificação do aparecimento de microfissuras.

Assim, comprova-se que as mudanças no fator de forma C decorrem do aparecimento de microfissuras no solo devidas ao processo de variação de temperatura imposto. Como uma tentativa de correlacionar o fator de forma C com a temperatura, utilizou-se a equação 74, dividindo-se o valor da condutividade hidráulica para os corpos de prova submetidos a diferentes gradientes de temperatura pelo valor da condutividade hidráulica para o corpo de prova que não foi submetido a gradientes de temperatura (temperatura ambiente).

Da equação 74, o primeiro, segundo e terceiro termos são constantes, então a relação entre as condutividades hidráulicas será a relação entre os fatores de forma para os corpos de prova submetidos a diferentes gradientes de temperatura com relação ao corpo de prova não aquecido. A Figura 38 mostra esta relação. Os fatores de forma parecem se correlacionar linearmente com o aumento de incremento de temperatura. Na Figura 38 também é mostrada uma relação exponencial ajustada aos dados experimentais do solo do Campo Experimental.

As variações das condutividades hidráulicas para o solo do Campo Experimental foram levemente maiores do que as variações obtidas para o solo do

Cidade dos Meninos. Este resultado pode ser justificado pela percentagem argilosa maior que tem o solo do Campo Experimental, 54% contra 29% do solo da Cidade dos Meninos, uma vez que estes microfissuramentos devem ser mais influenciados pelo material fino presente no solo.

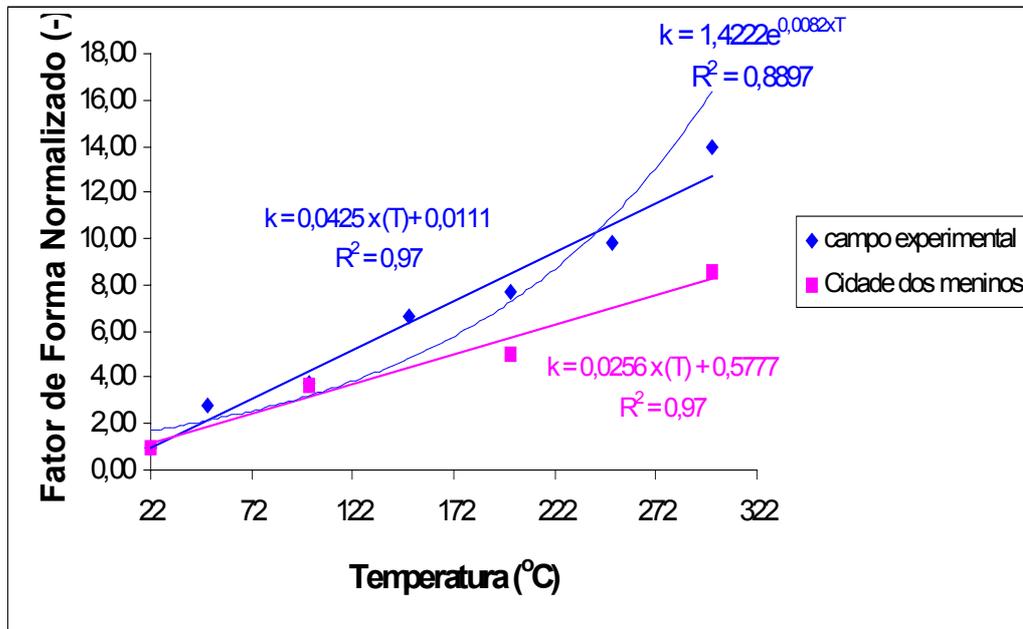


Figura 38 – Variação do fator de forma C para corpos de prova submetidos a diferentes gradientes de temperatura em mufla.

Constatou-se ainda que os corpos de prova do Campo Experimental, quando submetidos à temperatura ambiente para secagem, apresentaram uma redução constante no diâmetro do corpo de prova. Após a secagem ao ar os diâmetros dos corpos de prova reduziam-se de 10,14cm para 9,90cm apresentando esta redução constante mesmo que submetidos a gradientes de temperatura em mufla. A altura do corpo de prova não se alterou devido à secagem.

Para os corpos de prova da Cidade dos Meninos, a secagem ao ar fazia com que o diâmetro fosse reduzido de 10,14cm para 10,10cm e após aquecimento em estufa este diâmetro se mantinha com uma redução constante. Também não foram observadas variações nas alturas dos corpos de prova quando submetidos a aquecimento.

## 7.2 Condutividade Térmica e Calor Específico

Para as medidas de condutividade térmica e calor específico foi utilizada o método da sonda térmica. Os valores de condutividade térmica são fornecidos diretamente por um sistema de aquisição de dados ao qual a sonda térmica é conectada. Já o calor específico é obtido através de uma correlação com a difusividade. Os procedimentos utilizados para estas determinações estão descritos no item 6.2.1

Para as medidas de condutividade térmica e calor específico foram confeccionados corpos de prova com compactação estática, segundo os procedimentos especificados no item 5.2.1. Estes corpos de prova foram submetidos a diferentes tempos de secagem ao ar, simulando diferentes graus de saturação. Para cada valor de condutividade térmica apresentado foram feitas cinco medidas com a sonda térmica e calculada uma média dessas medidas.

### 7.2.1 Condutividade Térmica

Confeccionou-se corpos de prova conforme item 5.2.1. Os dados de confecção dos corpos de prova utilizados para a determinação da condutividade térmica estão listados na Tabelas 19.

De acordo com a Tabela 19, verifica-se que os valores médios para peso específico total, peso específico seco, índice de vazios e umidade para o solo do Campo Experimental foram: 17,03 kN/m<sup>3</sup>, 13,93 kN/m<sup>3</sup>, 0,93 e 22,23%, e, para o solo da Cidade dos Meninos os valores médios foram: 19,63 kN/m<sup>3</sup>, 16,61 kN/m<sup>3</sup>, 0,61 e 18,22%. Os parâmetros obtidos estão dentro da faixa média que reproduz os valores de campo.

Para se obter a curva de condutividade térmica x teor de umidade era necessário a determinação da condutividade térmica para diferentes teores de umidade. Após a compactação o corpo de prova era secado ao ar, dentro do molde de compactação por períodos diferentes. Os corpos de prova não eram retirados do molde de compactação para não se perturbar ou amolgar os mesmos durante a sua extração. O molde cilíndrico de compactação era então colocado na posição horizontal permitindo-se assim que a secagem ocorresse nas duas fases do corpo

de prova, esta posição permite uma secagem mais uniforme do corpo de prova. O molde de compactação era rotacionado três vezes ao dia.

A sonda térmica era inserida no corpo de prova até a profundidade de 5cm. A sonda térmica possui dois sensores de temperatura (termopares Pt100), um na ponta e outro aproximadamente 2 centímetros acima. Esta localização dos termopares fez com que as medidas fossem obtidas nas profundidades de 5 e 3cm. O resultado final da sonda é a média dos dois resultados nas diferentes profundidades. Para estas profundidades calculou-se a condutividade térmica média dos corpos de prova em determinada umidade.

Tabela 19 – Dados Iniciais dos Corpos de Prova

CP	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	w (%)	S (%)	Cidade dos Meninos					
						CP	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	w (%)	S (%)
01	17,27	13,99	0,93	23,45	68,27	01	19,21	16,21	0,59	18,54	81,70
02	17,10	13,98	0,93	22,32	64,89	02	19,25	16,40	0,60	17,38	75,31
03	17,03	13,96	0,93	21,98	63,72	03	19,50	16,47	0,60	18,25	79,08
04	16,99	13,89	0,94	22,28	63,95	04	19,85	16,80	0,60	18,15	78,27
05	17,03	13,92	0,93	22,32	64,34	05	20,03	16,92	0,59	18,4	80,83
06	17,12	13,98	0,93	22,45	65,28	06	19,42	16,42	0,60	18,26	79,13
07	17,24	14,17	0,90	21,64	64,75	07	19,63	16,57	0,63	18,46	76,78
08	16,98	13,95	0,93	21,76	62,94	08	19,98	16,82	0,60	18,76	81,20
09	16,67	13,63	0,98	22,31	61,57	09	19,67	16,63	0,62	18,31	76,81
10	17,31	14,14	0,90	22,42	66,75	10	19,89	16,86	0,60	17,97	78,23
11	16,83	13,78	0,95	22,12	62,44	11	19,15	16,25	0,6	17,84	80,35
12	16,56	13,55	0,99	22,21	60,58	12	19,09	16,15	0,61	18,21	74,16
13	16,89	13,80	0,95	22,42	63,43	13	18,99	16,05	0,62	18,33	72,62
14	16,97	13,91	0,94	21,98	63,26						
15	17,65	14,51	0,86	21,65	68,10						
16	17,28	14,15	0,90	22,13	65,97						
17	17,06	13,95	0,93	22,27	64,48						
18	16,79	13,73	0,96	22,32	62,49						
19	17,03	13,99	0,94	21,87	62,66						

Os dados dos corpos de prova do solo do Campo Experimental utilizados nos ensaios estão apresentados na Tabela 20, assim como os resultados de condutividade térmica obtidos. Para a determinação da condutividade térmica do solo com umidade higroscópica, este foi deixado secar ao ar durante quinze dias apresentando os valores de condutividade térmica de: 0,209 W/m<sup>o</sup>K para grau de saturação de 4,48% e umidade de 1,47%.

Os dados dos corpos de prova do solo da Cidade dos Meninos utilizados nos ensaios estão apresentados na Tabela 21, assim como os resultados de condutividade térmica obtidos. Para a determinação da condutividade térmica do

solo seco, este foi deixado secar ao ar durante quinze dias, sendo seu valor de  $0,274 \text{ W / m}^\circ\text{K}$ , com umidade de 1,22% e grau de saturação de 5,61%.

Nas Tabelas 20 e 21 estão listados os valores de condutividade térmica em duas unidades:  $\text{W/m.}^\circ\text{K}$  (que é a mais utilizada internacionalmente) e  $\text{mcal/cm.s.}^\circ\text{C}$ .

Tabela 20 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica - Campo Experimental

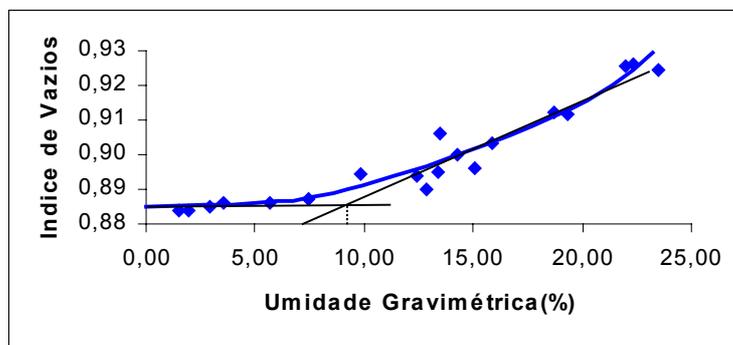
Ensaio	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	e	w (%)	S (%)	$\theta$ (%)	$\lambda$ ( $\text{W / m}^\circ\text{K}$ )	$\lambda$ ( $\text{mcal/cm.s.}^\circ\text{C}$ )
01	13,99	0,92	23,45	68,30	33,48	0,436	1,042
02	13,98	0,93	22,32	64,90	31,84	0,426	1,018
03	13,99	0,93	21,99	63,99	31,38	0,428	1,023
04	14,09	0,91	19,28	56,95	27,72	0,405	0,968
05	14,08	0,91	18,66	55,11	26,82	0,380	0,908
06	14,15	0,90	15,84	47,22	22,87	0,374	0,894
07	14,20	0,90	15,03	45,18	21,79	0,356	0,851
08	14,17	0,90	14,30	42,80	20,69	0,330	0,789
09	14,10	0,91	13,43	39,76	19,33	0,355	0,848
10	14,21	0,89	13,36	40,22	19,38	0,346	0,827
11	14,35	0,88	12,86	39,47	18,82	0,375	0,896
12	14,22	0,89	12,37	37,29	17,96	0,342	0,817
13	14,22	0,89	9,83	29,58	14,25	0,337	0,805
14	14,25	0,89	7,42	22,46	10,79	0,324	0,774
15	14,22	0,89	5,71	17,20	8,28	0,304	0,727
16	14,26	0,89	3,51	10,65	5,11	0,291	0,696
17	14,30	0,88	2,94	8,96	4,29	0,265	0,633
18	14,22	0,88	1,92	5,86	2,79	0,237	0,566
19	14,13	0,88	1,47	4,50	2,12	0,209	0,500

Tabela 21 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – Cidade dos Meninos

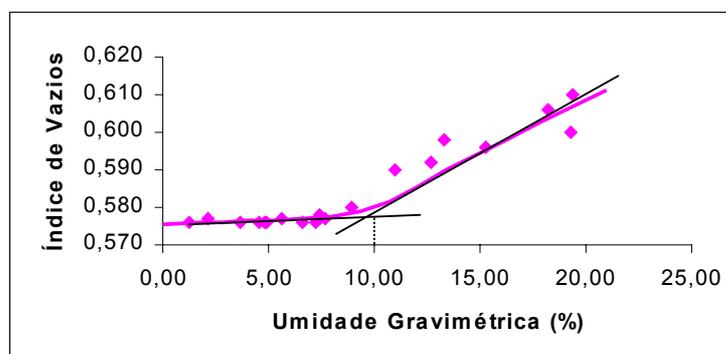
Ensaio	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	e	w (%)	S (%)	$\theta$ (%)	$\lambda$ ( $\text{W / m}^\circ\text{K}$ )	$\lambda$ ( $\text{mcal/cm.s.}^\circ\text{C}$ )
01	16,48	0,578	8,90	40,03	14,96	0,389	0,930
02	16,49	0,577	7,67	34,57	12,91	0,390	0,932
03	16,49	0,577	7,39	33,32	12,44	0,397	0,949
04	16,48	0,578	7,38	33,22	12,41	0,376	0,899
05	16,50	0,576	7,25	32,72	12,20	0,401	0,958
06	16,50	0,576	6,56	29,63	11,05	0,361	0,863
07	16,49	0,577	5,64	25,43	9,49	0,370	0,884
08	16,50	0,576	4,94	22,28	8,31	0,368	0,880
09	16,50	0,576	4,80	21,67	8,08	0,354	0,846
10	16,50	0,576	4,51	20,36	7,59	0,371	0,887
11	16,50	0,576	3,67	16,58	6,18	0,326	0,779
12	16,49	0,577	2,12	9,55	3,56	0,319	0,762
13	16,50	0,576	1,22	5,51	2,05	0,274	0,655

As Tabelas 20 e 21 apresentam a variação do índice de vazios com a umidade. Considerando-se esta relação pode-se retirar o valor do limite de contração. O limite de contração é atingido quando o corpo de prova pára de se deformar (contrair) com o decréscimo da umidade, isto pode ser sentido na variação do índice de vazios. Para a determinação do limite de contração plota-se gráficos de índice de vazios por umidade gravimétrica, conforme a Figura 39. Traça-se retas tangentes aos dois trechos curvos dos gráficos e onde estas retas se encontram tem-se o limite de contração. Os limites de contração para o solo do Campo Experimental e para o solo da Cidade dos Meninos estão apresentados na Figura 39(a) e (b) respectivamente.

Para a determinação do limite de contração do solo da Cidade dos Meninos, foram utilizados mais dados dos que os apresentados na Tabela 21, uma vez que, para as medidas da condutividade térmica com a sonda somente era possível obter medidas para valores de umidade baixos. A sonda térmica aqui utilizada tem como medida de condutividade térmica confiável máxima o valor de 0,410 W/m<sup>o</sup>K. Para o solo da Cidade dos Meninos este valor é atingido para níveis baixos de umidade. Os solos arenosos tendem a ter maiores valores de condutividade térmica do que os solos argilosos.



(a)



(b)

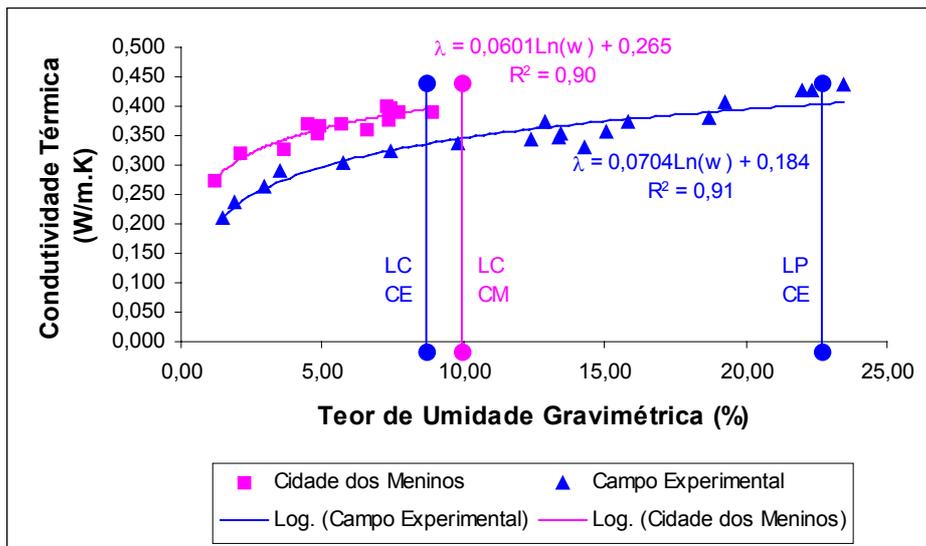
Figura 39 – Variação do índice de vazios com a umidade, limite de contração:

(a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.

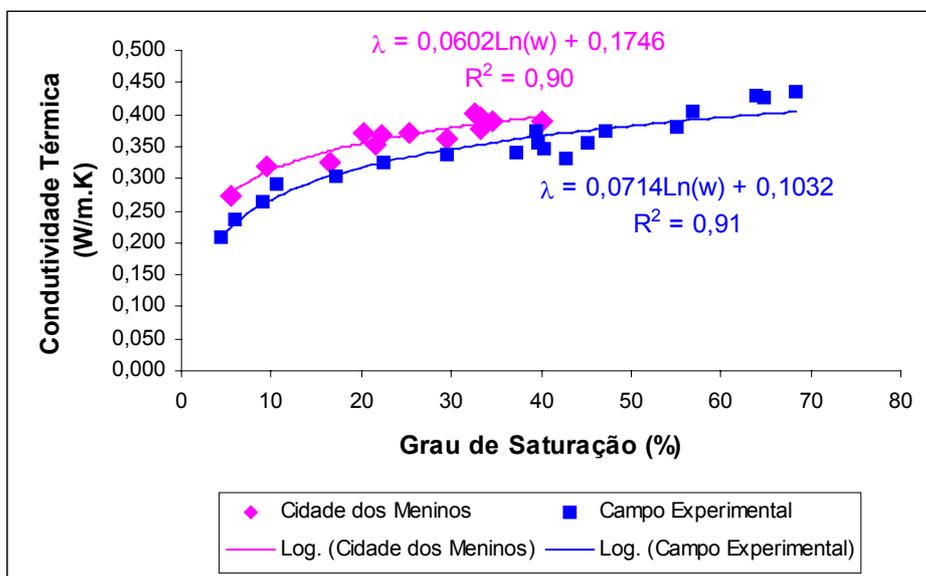
A variação do índice de vazios do solo da Cidade dos Meninos está ocorrendo na terceira casa decimal, conforme a Tabela 21. Observa-se através da Figura 39 que para o solo do Campo Experimental o limite de contração é da ordem de 9%, enquanto para o solo da Cidade dos Meninos o limite de contração é da ordem de 10%. Este limite de contração menor para o solo do Campo Experimental já era esperado, uma vez que este é mais argiloso, e vinha apresentando maiores deformações diametraais quando submetido a secagem ao ar.

Na Figura 40 é exibido o comportamento da condutividade térmica com a umidade gravimétrica (a), com o grau de saturação (b) e com a umidade volumétrica (c). Observa-se que os valores de condutividade térmica para o solo da Cidade dos Meninos foram maiores que os obtidos para o solo do Campo Experimental, considerando-se um mesmo grau de saturação. Este resultado já era esperado, uma vez que a condutividade térmica é função dos minerais que constituem o solo e do índice de vazios. O solo da Cidade dos Meninos tem um teor de areia maior que o solo do Campo Experimental. Conforme já mencionado no Capítulo 3, a condutividade térmica de grãos de quartzo é maior do que a de minerais argilosos, e, o índice de vazios dos solos da Cidade dos Meninos foi da ordem de 0,6 enquanto o dos solos do Campo Experimental foi da ordem de 0,9. As melhores equações que ajustaram estas curvas foram logarítmicas, e estão apresentadas na Figura 40.

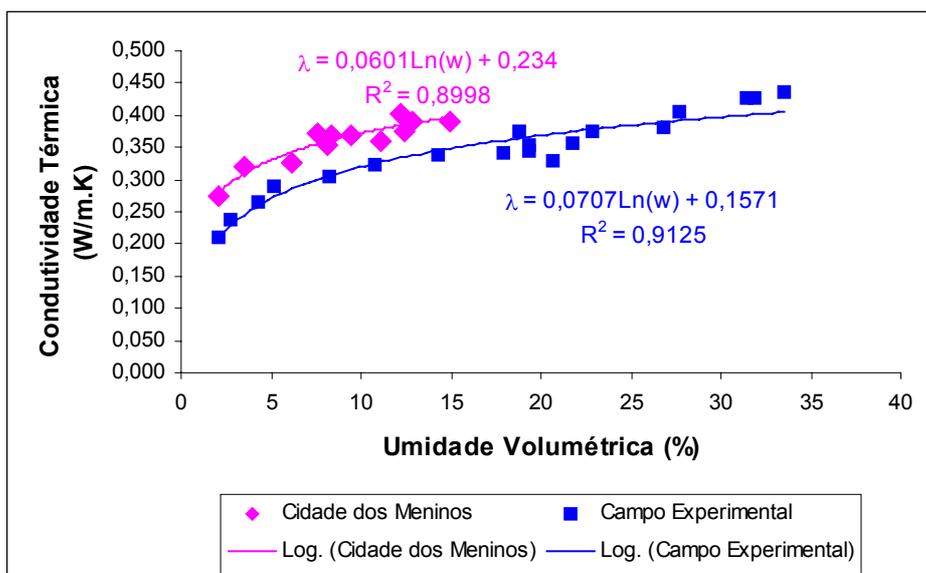
Para a determinação da condutividade térmica do solo da Cidade dos Meninos encontrou-se dificuldades. A sonda utilizada tem como valor máximo de medida de condutividade térmica  $0,410 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ , sendo este valor atingido com grau de saturação de 30%. Era necessário deixar a amostra secando ao ar, mais de uma semana, para a primeira medida. O valor constante de condutividade térmica após este valor não pode ser confirmada. Acredita-se que este deveria ainda crescer até próximo a sua saturação para que as medidas de condutividade térmica ficassem constantes, como foi o caso do solo do Campo Experimental.



(a)



(b)



(c)

Figura 40 – Curva de condutividade térmica x umidade gravimétrica (a); condutividade térmica x grau de saturação(b); condutividade térmica x umidade volumétrica (c).

Para o solo da Cidade dos Meninos, observa-se na Figura 40, que somente foram medidos valores de condutividade térmica abaixo do limite de contração, devido a faixa de trabalho da sonda térmica. No caso do solo do Campo Experimental após o limite de contração houve uma variação na curvatura da equação de tendência logarítmica (ajuste de curva) da condutividade térmica com a umidade.

Os resultados da Figura 40 apresentam o mesmo padrão de comportamento que os encontrados por Oliveira Jr. (1993), que determinou a condutividade térmica, de um solo areno-siltoso, fabricado a partir de granito moído, com classificação granulométrica de areia e densidade seca de  $2,1 \text{ Mg/m}^3$ . Os valores obtidos também foram exponencialmente crescentes até um grau de saturação de aproximadamente de 70%, se mantendo como uma assíntota constante.

Houve uma certa dificuldade na correlação dos dados existentes na literatura com os aqui ensaiados, devido à escassez de parâmetros relatados pelos autores, pois normalmente os autores citavam somente a classificação do solo e seu peso específico. Baver et al. (1972) realizaram ensaios numa areia de granulometria média com densidade seca de  $1,3 \text{ Mg/m}^3$ , obtendo também um padrão de comportamento que tende a um valor constante para altos valores de grau de saturação. Jonhansen (1975) fez estudos da condutividade térmica de uma turfa, constatando que esta é extremamente dependente da umidade e que esta apresentou condutividades térmicas mais baixas que as condutividades térmicas de solos convencionais citados na literatura. Nakshabandi (1965), apud Farouki (1986), ensaiou uma argila cinza compactada e obteve resultados crescentes com a umidade, variando-se da umidade seca até a umidade de saturação.

Os resultados obtidos pelos autores acima citados foram plotados juntamente com os resultados de ensaios aqui obtidos, conforme Figura 41. Pode-se observar que os solos tropicais tem valores tipicamente menores que os relatados. Os solos aqui ensaiados apresentaram padrão de comportamento médio, estando com valores entre a areia e a argila, mais próximos dos valores da argila. Os solos arenosos ensaiados relatados na literatura normalmente são solos fabricados ou areias puras, sendo constituídos praticamente em sua totalidade por grãos de quartzo, por isso apresentam valores tão altos de condutividade térmica. As areias que se encontram na natureza apresentam uma mistura com outros tipos de solo, fazendo assim com que suas condutividades sejam menores.

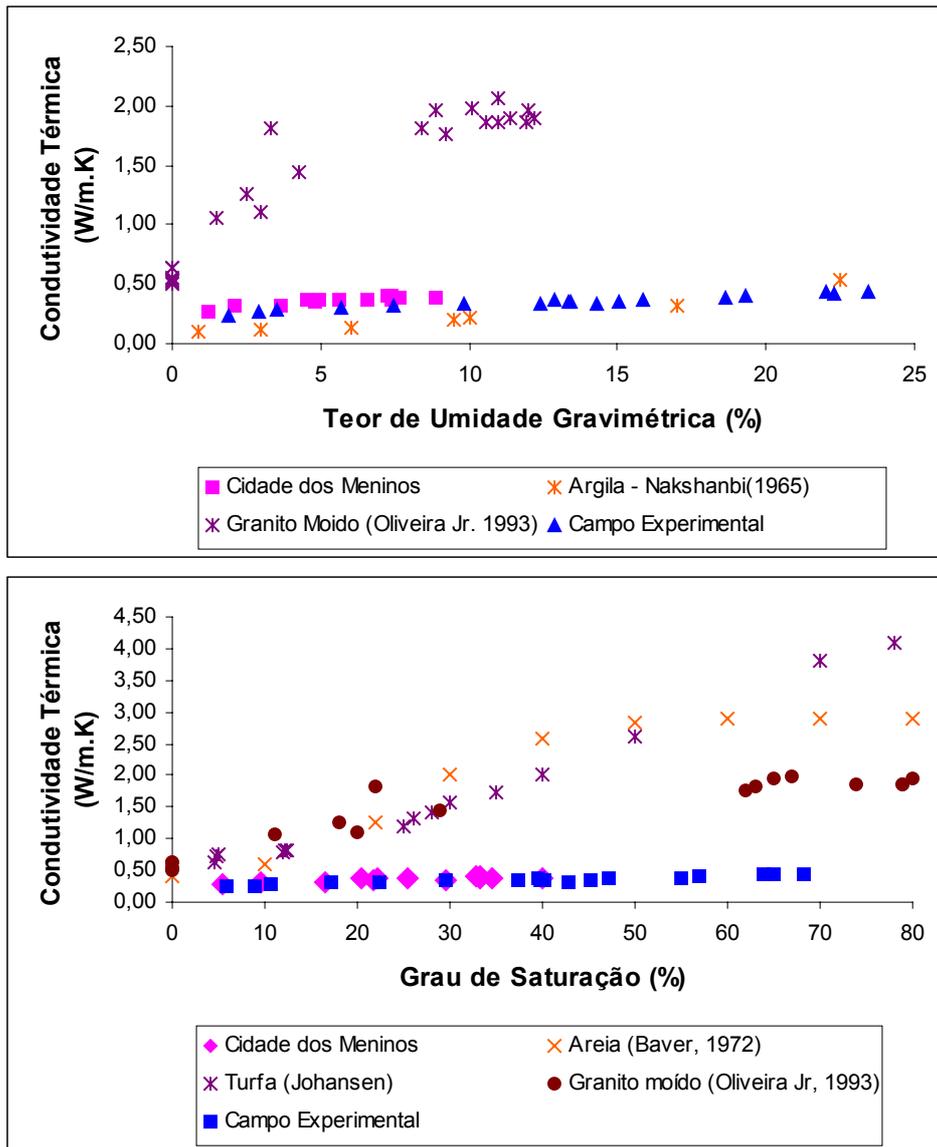


Figura 41- Comparação dos valores de Condutividade Térmica

Estes autores utilizaram-se do método da agulha térmica para determinação desses valores. A metodologia de determinação da condutividade térmica é a mesmo aqui empregada. A única variação que pode ocorrer nesta metodologia está na maneira de como o corpo de prova é compactado.

Ren et al. (1999) desenvolveram um novo equipamento, com base em reflexão de ondas. Um TDR (reflectômetro térmico) foi desenvolvido baseado na teoria de aquecimento linear, a mesma teoria de desenvolvimento da agulha térmica, realizando ensaios numa areia e numa argila superficial, obtendo valores de condutividade térmica crescentes exponencialmente com a umidade volumétrica. Os valores de condutividade térmica encontrados tendiam a um valor constante para umidades volumétricas superiores a 30%. Os valores de

condutividade térmica da areia crescem mais acentuadamente com a aumento da umidade volumétrica (de 0 a 0,3) de 0,25 até 2,4 W/m.°C do que para o solo argiloso de 0,15 até 1,2 W/m.°C.

Com os ensaios realizados fica evidente a dependência da condutividade térmica com relação a quantidade de água que existe num determinado corpo de prova, e esta não pode ser considerada como um valor único para cada tipo de solo. Os valores relatados na literatura normalmente não correlacionam a condutividade térmica com a umidade ou grau de saturação, pois existem tabelas de condutividade térmica que levam em conta somente a classificação granulométrica do solo em questão, conforme Michtell(1993), Baver (1956) e Farouki(1986). Como um dos primeiros estudos geotécnicos sobre parâmetros térmicos, Mitchell e Kao (1978) desenvolveram uma agulha térmica de cerâmica e determinaram o valor da condutividade térmica em areia fina sem levar em conta a sua dependência com a umidade, determinando um único valor de 0,308 W/m.°C. Estes valores únicos são até hoje utilizados como representativos para um determinado tipo de solo, o que deve se tomar muito cuidado, pois estes valores de condutividade térmica podem muitas vezes não simularem bem um caso real.

Uma tentativa de se obter a relação da condutividade térmica para solos secos foi proposta por Jonhansen (1975). Esta correlação é função somente do peso específico seco do solo:

$$\lambda = \frac{0,135\gamma_d + 64,7}{2700 - 0,947.\gamma_d} \pm 20\% \quad (75)$$

Vale ressaltar que esta equação foi obtida com base em dados existentes na literatura consultada pelo autor. Aplicando-se esta equação para o caso dos solos estudados obteve-se valores de condutividade térmica de 0,196 e 0,264 W/m.°K para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos, respectivamente. Estes valores estão bem próximos dos encontrados experimentalmente (0,209 W/m.°K e 0,274 W/m.°K), mostrando que esta equação pode vir a ser uma boa estimativa do valor de condutividade térmica para solos secos.

Existem na literatura algumas propostas para previsão do comportamento da condutividade térmica com a saturação e com a umidade gravimétrica. Três previsões foram utilizadas para os dados aqui obtidos.

Kersten (1949) fez um elaborado estudo experimental de como a condutividade térmica se comportaria com a umidade gravimétrica, propondo a relação empírica mostrada a seguir:

$$\lambda = (0,9 \log w - 0,2)10^{0,01\gamma_d} \quad \text{solos finos} \tag{76}$$

$$\lambda = (0,7 \log w + 0,4)10^{0,01\gamma_d} \quad \text{areia limpa}$$

Outra formulação também já descrita no Capítulo 3 é a de Jonhansen (1975):

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{sec o}) \lambda_e + \lambda_{sec o} \tag{77}$$

$\lambda_{sec o} = \frac{0,137 \cdot \gamma_d + 64,7}{2700 - 0,947 \cdot \gamma_d}$

$\lambda_e \cong \log S + 1$

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n$$

$\lambda_s = \lambda_q^q \cdot \lambda_o^{(1-q)}$

Para o cálculo da condutividade térmica saturada utilizou-se valores propostos pelo autor:  $\lambda_q = 7,0 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  (quartzo),  $\lambda_o = 2,0\text{W/m.}^\circ\text{C}$  (outros minerais). A relação quantidade de quartzo com a fração total dos sólidos, q, utilizada foi de 0,1 para o solo do Campo Experimental e 0,3 para o solo da Cidade dos Meninos. O menor valor de q para o solo do Campo Experimental se deve ao fato desse ser um solo mais argiloso do que o da Cidade dos Meninos. Estes valores utilizados são os recomendados pelo autor.

A última formulação utilizada foi a equação empírica proposta por Ewen (1998):

$$\lambda = A + B[1 - \exp(C.S)] \quad (78)$$

onde A, B e C são parâmetros obtidos para o ajuste dos dados experimentais, e S é o grau de saturação. No lugar de S pode também ser usado w.

As Figuras 42 e 43 apresentam os dados experimentais aqui obtidos e as equações propostas. Os parâmetros de Ewen que melhor ajustaram os dados do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos quanto a curva de saturação foram respectivamente: A= 0,209, B=2,83 e C=-0,143; A =0,274, B=2,57 e C=-0,138 e quanto a umidade: A= 0,209, B=8,879 e C=-0,245; e A=0,274, B=10,526 e C=-0,15.

Pode-se observar pelas Figuras 42 e 43 que as previsões propostas por Kersten e Jonhansen não ajustaram bem os dados, pois essas equações empíricas foram baseadas em solos que não são semelhantes aos solos tropicais brasileiros. Além de terem sido propostas com base em dados obtidos a partir de solos arenosos fabricados, conforme já mencionado anteriormente.

Como os valores de condutividade térmica aqui obtidos, foram mais baixos que os valores de condutividade térmica estimados, o fluxo de calor real dentro do solo irá ocorrer de maneira mais lenta do que quando levados em conta os parâmetros estimados. Isto é uma medida contra a segurança no caso da dessorção térmica, uma vez que esta se baseia no aquecimento do solo. Com os parâmetros estimados poder-se-ia acreditar que a temperatura para a vaporização de um determinado contaminante já havia sido atingida, enquanto isso ainda não ocorreu.

A equação de Ewen, que é um ajuste de curva, mostrou que pode prever bem o comportamento da condutividade térmica de um solo com o aumento de umidade. O inconveniente desta equação é que para ajustá-la precisamos dos dados experimentais.

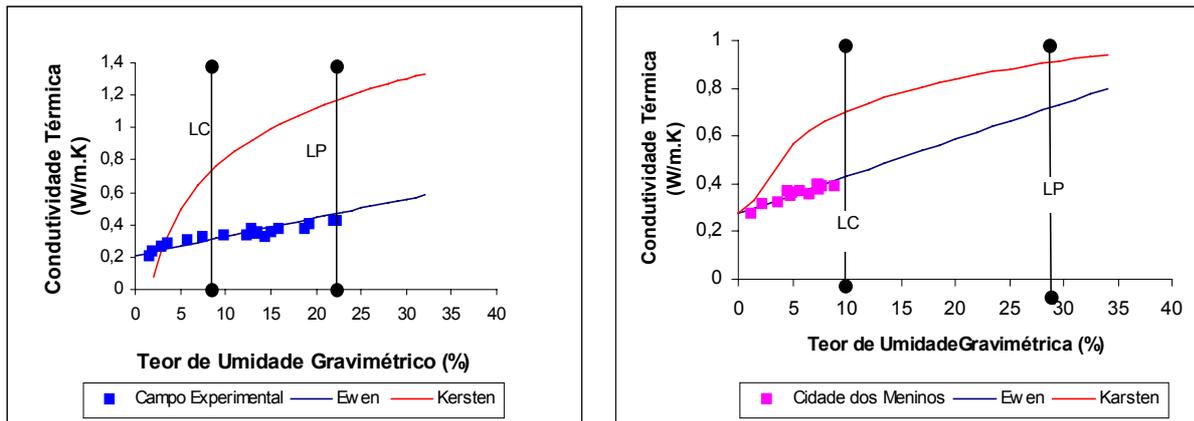


Figura 42 – Previsões da Condutividade Térmica com a umidade gravimétrica

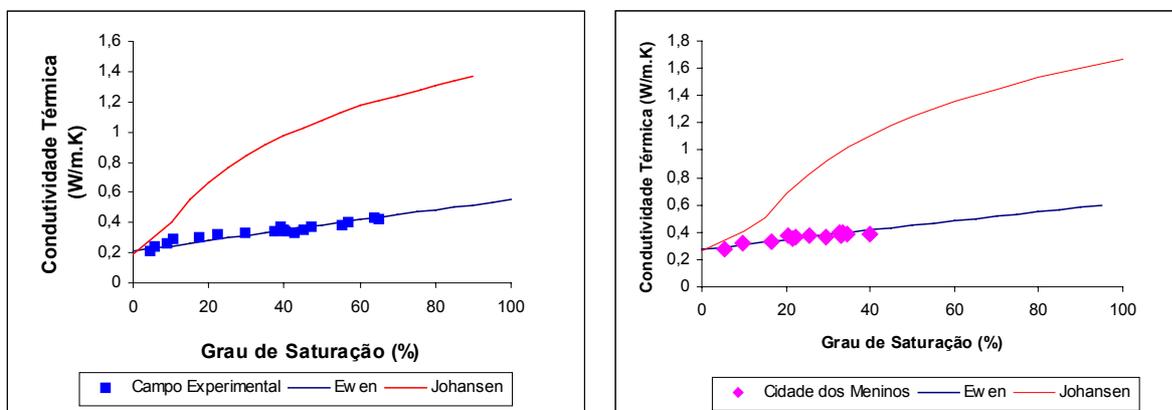


Figura 43 – Previsões da Condutividade Térmica com o grau de saturação

### 7.2.2 Calor Específico

Confeccionou-se corpos de prova, conforme o item 5.2.1. Os dados de confecção dos corpos de prova utilizados para a determinação do calor específico estão listados na Tabela 22.

De acordo com a Tabela 22 verifica-se que os valores médios para peso específico total, peso específico seco, índice de vazios e umidade para o solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos respectivamente foram: 16,88 kN/m<sup>3</sup>, 13,76 kN/m<sup>3</sup>, 22,63% e 0,96; e, 19,24 kN/m<sup>3</sup>, 16,26 kN/m<sup>3</sup>, 18,32% e 0,60, estando os valores dentro da faixa média que reproduz os valores de campo, conforme Tabela 9 e 10 apresentadas no Capítulo 5.

Após a compactação, os corpos de prova eram deixados secar ao ar, dentro do molde de compactação de latão, em diferentes intervalos de tempo, com o intuito de se obter os valores de calor específico como função da umidade.

Novamente os moldes de compactação eram colocados na posição horizontal para que ambos as faces dos corpos de prova pudessem secar livremente.

Tabela 22 – Dados Iniciais dos Corpos de Prova

Campo Experimental						Cidade dos Meninos					
CP	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	w (%)	S (%)	CP	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	w (%)	S (%)
01	16,93	13,79	0,95	22,65	64,21	01	19,50	16,39	0,59	19,00	83,73
02	16,76	13,67	0,97	22,57	62,66	02	18,92	16,04	0,62	17,92	75,15
03	16,98	13,83	0,95	22,68	64,29	03	19,32	16,34	0,59	18,23	80,34
04	16,87	13,75	0,96	22,63	63,48	04	19,23	16,28	0,60	18,13	78,56

Os procedimentos de ensaio estão descritos no item 6.2.2. Para a medida da condutividade térmica utilizou-se a agulha térmica, fazendo-se um pré furo com uma broca de diâmetro de 1,5 mm. Foram realizadas cinco medidas e adotado o valor médio. Foram feitas cinco medidas para se obter um valor médio com maior precisão, visando a repetibilidade das condutividades térmicas obtidas.

Os dados iniciais dos corpos de prova utilizados na medição do calor específico estão listados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados dos corpos de prova utilizados na determinação do calor específico

CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	w (%)	S (%)	$\lambda$ (W/m <sup>o</sup> K)	CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	W (%)	S (%)	$\lambda$ (W/m <sup>o</sup> K)
01	14,12	0,91	13,04	38,71	0,364	01	16,89	0,60	15,24	66,65	0,410
02	14,08	0,91	7,93	23,40	0,374	02	16,88	0,60	7,70	33,68	0,393
03	14,10	0,91	12,22	36,18	0,344	03	17,01	0,58	2,28	10,19	0,301
04	14,31	0,88	1,92	5,87	0,243	04	16,94	0,59	6,01	26,46	0,369

Durante os ensaios observou-se também a dependência do calor específico com a temperatura, sendo realizados ensaios nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. As condutividades térmicas eram medidas antes do início dos ensaios a diferentes temperaturas. Estas eram mantidas praticamente constantes, posto que todo o sistema estava hermeticamente fechado.

O primeiro ensaio de condutividade térmica da Cidade dos Meninos, foi desconsiderado, pois o valor de condutividade térmica medido não está coerente com a sua umidade. O valor máximo de condutividade térmica medido nesta sonda é de 0,410 W/m<sup>o</sup>K, devido a sua faixa de trabalho. Após atingir a condutividade térmica referente a esta umidade, este valor se mantém constante

independentemente do aumento da umidade do corpo de prova. De acordo com a Figura 40, para uma umidade gravimétrica de 15,24%, a condutividade térmica para o solo da Cidade dos Meninos deveria ter um valor bem maior do que o indicado pela sonda.

A Figura 44 mostra as curvas de variação de temperatura, medidas no centro da amostra com relação ao tempo, tomando como exemplo o ensaio com o corpo de prova 04 para o solo do Campo Experimental. As curvas traçadas para os demais ensaios se encontram no Apêndice C.

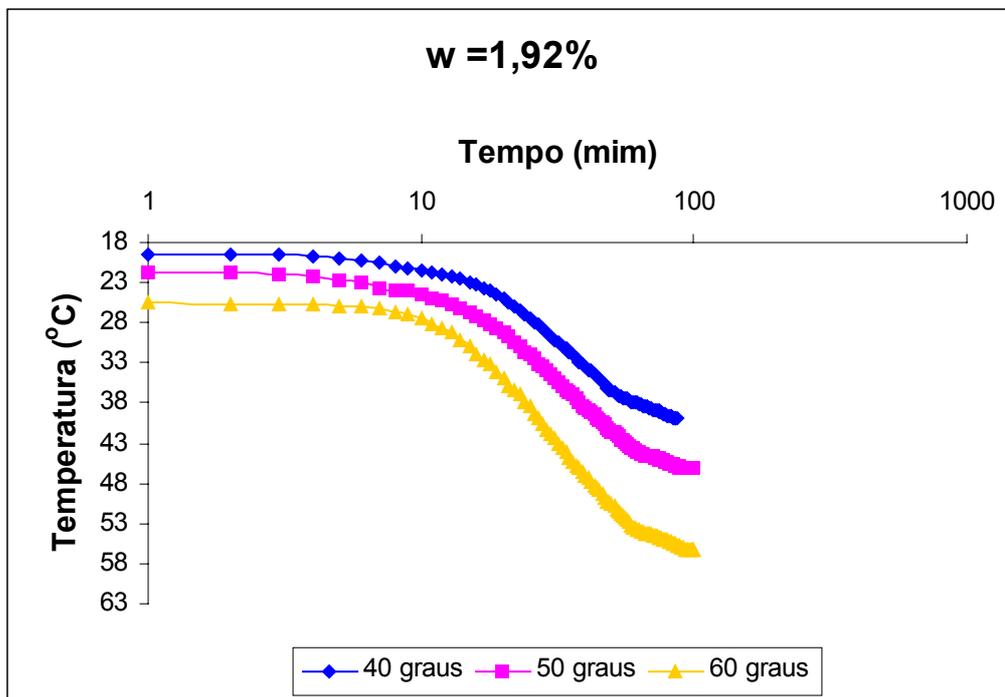


Figura 44- Variação da temperatura com o tempo para o solo do Campo Experimental com umidade higroscópica de 1,42%

Das relações temperatura x tempo, apresentada na Figura 43, retira-se o valor de  $t_{50}$  (tempo em que houve a variação de 50% na temperatura) e calcula-se a difusividade térmica de acordo com a relação:

$$D = \frac{\phi^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (79)$$

onde:  $\phi$  é o diâmetro do corpo de prova ensaiado e  $T_{50}$  é o fator tempo retirado da Figura 26, constante neste caso para todos os ensaios, e igual a 0,05.

Com o valor da difusividade térmica (D) e os parâmetros listados na Tabela 21, calcula-se o calor específico do meio:

$$c_s = \frac{\lambda}{\rho_d \cdot D} (1 + e) - w \quad (80)$$

A Tabela 24 apresenta os valores obtidos para difusividade térmica e calor específico em determinadas umidades para diferentes temperaturas, encontrados para o solo do Campo Experimental. Os resultados de calor específico relatados na literatura para solos cauliniticos é 0,233 cal/g°C (Baver, 1956). Vale ressaltar que a grande maioria dos valores de calor específico apresentados na literatura, Baver, 1956, Mitchell, 1983, Farouki, 1986, são únicos para uma determinada classificação de um solo, e, independentes da temperatura em que foram ensaiados e da umidade que se encontravam. Isto aqui é demonstrado como sendo o que realmente não ocorre, o calor específico é dependente da temperatura e da umidade que se encontram um determinado tipo de solo.

Tabela 24- Valores de calor específico com relação a umidade e temperatura para o solo do Campo Experimental.

CP	Temperatura externa (°C)	t <sub>50</sub>	D x 10 <sup>-3</sup> (cm <sup>2</sup> /s)	c <sub>s</sub> (cal/g°C)	c <sub>s</sub> x 10 <sup>3</sup> (J/kg°C)
01	45,8	25,8	3,26	0,248	1,038
	48,8	26,5	3,17	0,251	1,051
	57,7	27,3	3,08	0,263	1,101
02	42,3	25,8	3,25	0,235	0,984
	52	26,9	3,12	0,246	1,030
	57,7	27,5	3,05	0,255	1,068
03	45	27,9	3,02	0,248	1,038
	51,1	28,6	2,94	0,255	1,068
	56,1	29,2	2,88	0,265	1,110
04	39,8	26,5	3,14	0,223	0,993
	49,1	27,7	3,01	0,235	0,998
	56,3	28,5	2,92	0,243	1,017

A Figura 45 mostra a relação do calor específico, para uma determinada umidade, com a temperatura. Através desta Figura observa-se que a relação de calor específico com a temperatura se manteve com uma inclinação praticamente constante, indicando que o aumento de umidade faz com que a curva simplesmente se desloque para cima. Os ensaios para os corpos de prova 3 e 1 com umidade de 13,04% e 12,21%, podem ser considerados com um único resultado, uma vez que os valores dos índices de vazios e das umidades estão muito próximos. Para estes dois ensaios foi traçado somente um regressão linear, Figura 45.

A Tabela 25 apresenta os valores obtidos da difusividade térmica e do calor específico em determinadas umidades para diferentes temperaturas, para o solo da Cidade dos Meninos. De acordo com Baver (1956), como os solos arenosos finos devem apresentar valores de calor específico na ordem de 0,194 cal/g°C, conclui-se que os resultados aqui encontrados estão dentro desta faixa. Os dados relatados pelo autor, levam em conta somente a classificação granulométrica.

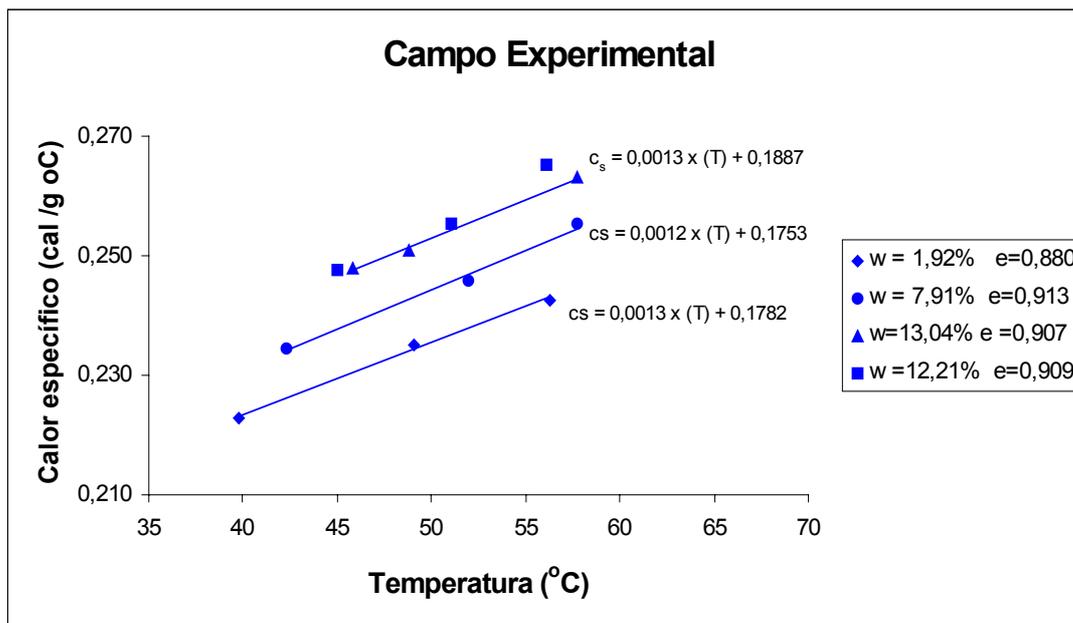


Figura 45- Relação do Calor Específico com a temperatura para o solo do Campo Experimental.

Tabela 25- Valores de calor específico com relação a umidade e temperatura para o solo da Cidade dos Meninos.

CP	Temperatura externa (°C)	t <sub>50</sub>	D x 10 <sup>-3</sup> (cm <sup>2</sup> /s)	c <sub>s</sub> (cal/g°C)	c <sub>s</sub> x 10 <sup>3</sup> (J/kg°K)
01	41,6	25,5	3,33	0,188	0,787
	51,5	26,5	3,23	0,197	0,825
	59,7	27	3,17	0,204	0,854
02	43,9	25,4	3,35	0,177	0,741
	49,4	26,2	3,27	0,182	0,762
	61,5	26,9	3,18	0,188	0,787
03	45,8	25,5	3,33	0,187	0,783
	49,3	25,8	3,32	0,190	0,795
	57,3	26,4	3,25	0,195	0,816

A Figura 46 apresenta as relações de calor específico, para determinadas umidades, com relação a temperatura. Da mesma maneira do que foi encontrado para o solo do Campo Experimental, observa-se que o aumento de umidade para os corpos de prova da Cidade dos Meninos somente fez com que as relações de calor específico com a temperatura somente se deslocassem para cima mantendo a mesma inclinação.

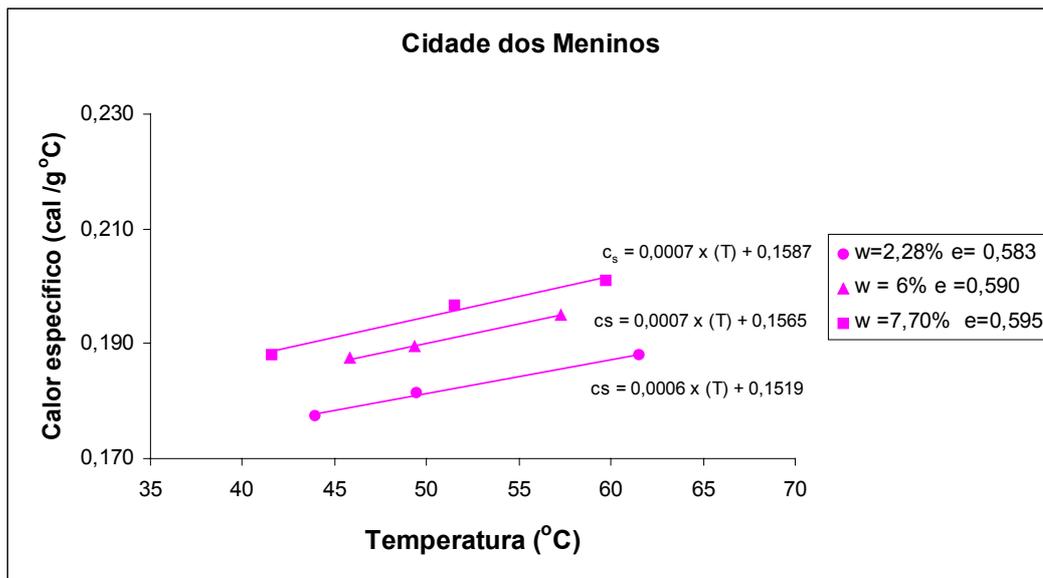


Figura 46- Relação do Calor Específico com a temperatura para o solo da Cidade dos Meninos.

Usando-se uma metodologia de ensaio semelhante a aqui empregada, Mitchell e Kao (1978) determinaram o calor específico de uma areia seca, obtendo o valor de 0,18 cal/g°C para a temperatura de 40°C. Os autores não levaram em conta a temperatura na determinação do calor específico. O calor específico determinado pelos autores foi o calor específico dos grãos, uma vez que utilizaram em seus ensaios um solo completamente seco.

Na literatura existem determinações do calor específico levando em conta a variação do mesmo com a temperatura e a umidade. Os resultados aqui encontrados com relação as inclinações das curvas de calor específico em se manterem constantes e somente se deslocarem para cima com o aumento da umidade, também foram relatadas por Hayes et al. (1980). Os autores determinaram o calor específico de um solo siltoso e de uma areia para diferentes valores de temperatura e variando a sua umidade. A faixa de variação de

temperatura do ensaio foi de  $-50^{\circ}\text{C}$  até  $40^{\circ}\text{C}$ . Para temperaturas acima de zero, os autores citados também concluíram que as curvas mantinham a mesma inclinação e somente se deslocavam para cima com o aumento de umidade. Para o solo siltoso, na umidade higroscópica (1,0%) os valores de calor específico obtidos variaram de 0,19 a 0,24 cal/g $^{\circ}\text{C}$  para temperaturas de 5 até  $40^{\circ}\text{C}$ . O solo arenoso, que estava completamente seco, teve uma variação no calor específico de 0,18 a 0,22 cal/g $^{\circ}\text{C}$  para temperaturas de 5 até  $40^{\circ}\text{C}$ .

O solo mais argiloso (Campo Experimental) apresentou uma maior variação nos valores de calor específico do que o solo mais arenoso (Cidade dos Meninos) para as temperaturas ensaiadas. Este fato vem a enfatizar que solos argilosos mantêm o calor por mais tempo que os solos arenosos. Em compensação os solos arenosos se aquecem mais rapidamente que o solos argilosos.

Com o intuito de se verificar a influência do índice de vazios no calor específico, compactou-se corpos de prova com energias diferentes e os resultados obtidos são apresentados na Figura 47. Foram confeccionados corpos de prova onde o índice de vazios sofreu variação da ordem de 45% e de acordo com a figura verifica-se que a o comportamento do calor específico foi alterado. Para a comparação utilizou-se das curvas obtidas anteriormente com valores de umidade similares ao novo corpo de prova.

Os dados destes novos corpos de prova ensaiados, assim como as suas curvas de temperatura x tempo estão apresentados no Apêndice C.

Verifica-se na Figura 47 que um aumento no índice de vazios resultou em comportamentos contrários para os solos ensaiados. No caso do solo do Campo Experimental um aumento no índice de vazios causou um aumento no calor específico, já para o solo da Cidade dos Meninos o aumento no índice de vazios causou uma diminuição nos valores de calor específico. Para ambos os solos um aumento no índice de vazios ocasionou uma diminuição no peso específico seco, e os valores de condutividade térmica diminuíram com o aumento do índice de vazios. Esta diminuição da condutividade térmica com o índice de vazios já era esperado, pois o calor passa mais rapidamente no contato entre os grãos do que nos vazios preenchidos com a água ou o ar. O comportamento diferenciado para os solos se deve a variação na ordem de grandeza dos valores dos índice de vazios, para o solo do Campo Experimental este passa de 0,91 para 1,32 e 1,25, fazendo com que o aumento do índice de vazios e a diminuição do peso específico

seco seja superior do que a diminuição da condutividade térmica, equação 80. Para o solo da Cidade dos Meninos o aumento do índice de vazios é de 0,58 para 0,75 e 0,84, fazendo com que a diminuição da condutividade térmica seja mais sentida do que o aumento do índice de vazios e diminuição do peso específico seco, fazendo com que os valores de calor específico fiquem menores com o aumento o índice de vazios.

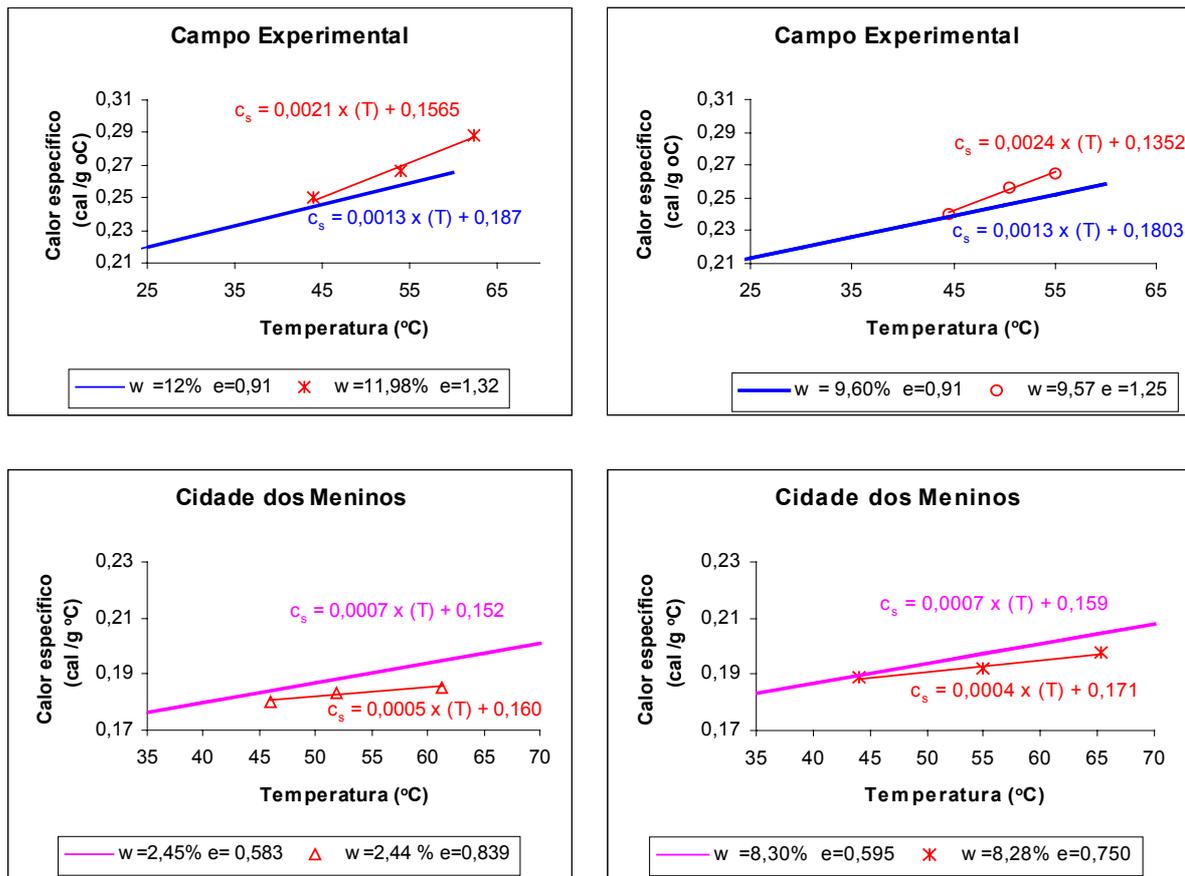


Figura 47 – Variação do calor específico com a temperatura analisando-se o índice de vazios.

### 7.3 Curvas Características de Sucção

Na determinação das curvas características, ou curva de retenção de umidade, utilizou-se a técnica de determinação da sucção através do método do papel-filtro, conforme descrito no item 6.3. A metodologia utilizada está descrita

no item 6.3.1. A forma como este solo foi compactado está descritos no item 5.2.1.

Para o solo do Campo Experimental foram determinadas um total de nove curvas características. Cinco delas seguiram a trajetória de umidecimento (temperatura ambiente, 50°C, 100°C, 200°C e 300°C). Três delas seguiram a trajetória de secagem (temperatura ambiente, 100°C e 300°C). E uma delas seguiu a trajetória de umidecimento e secagem na mesma curva (temperatura ambiente). Para o solo da Cidade dos Meninos foram traçadas quatro curvas características seguindo-se a trajetória de umidecimento (temperatura ambiente, 100 °C, 200 °C e 300°C).

Cada curva característica foi traçada com pelo menos 10 pontos. Para cada corpo de prova compactado tirava-se duas amostras indeformadas, sendo estas submetidas a temperatura do ensaio. Os parâmetros iniciais dos corpos de prova utilizadas estão apresentados no Apêndice D, assim como os gráficos para a determinação da umidade do papel-filtro.

Em uma primeira determinação da curva característica, sem levar em conta o efeito da temperatura, executou-se tanto a trajetória de umidecimento como a de secagem, para o solo do Campo Experimental. A Figura 48 mostra as curvas características de sucção deste solo seguindo-se estas trajetórias.

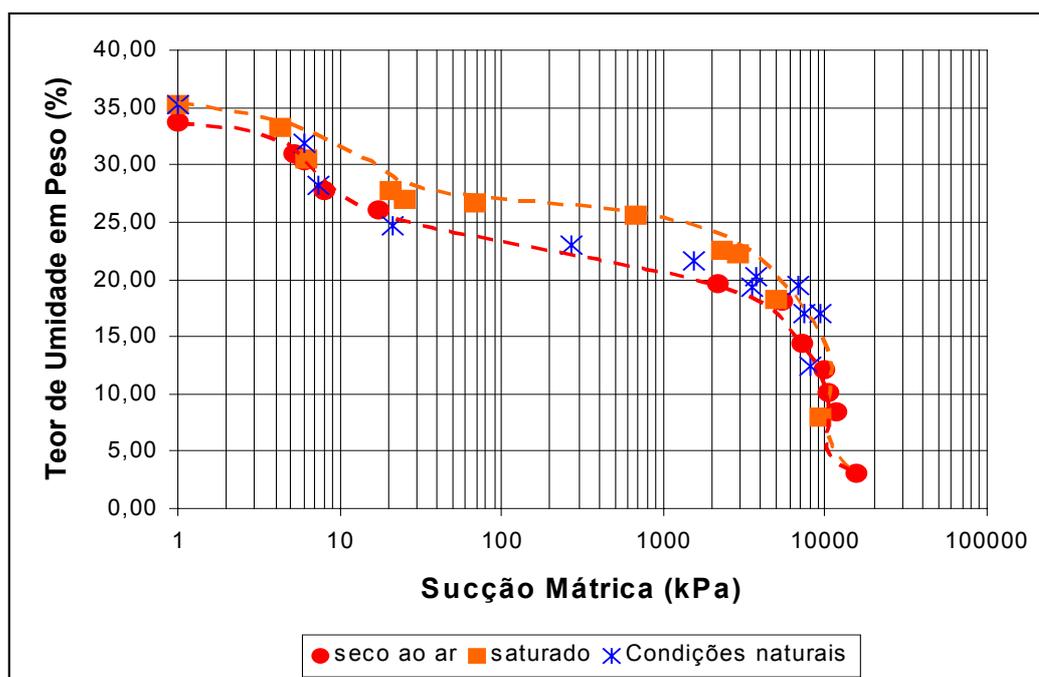


Figura 48 – Curva característica em função do teor de umidade em peso.

Na Figura 48 nota-se que a histerese entre a trajetória de umidecimento e a de secagem ocorre até o limite de contração (aproximadamente 9%). Após este valor, a histerese para efeitos práticos é nula. Verifica-se que a histerese é máxima quando próximo ao limite de plasticidade do material, i.e. 22,4%. Para a umidade natural média (aproximadamente 22%) o solo apresentou uma sucção mátrica de 190kPa e de 2300kPa, dependendo se a trajetória for de umidecimento ou de secagem, ressaltando o feito da histerese nestas curvas. Na umidade higroscópica, i.e. 2%, o valor da sucção mátrica foi bastante alto, da ordem de 17.000kPa. O valor de sucção encontrado está dentro da capacidade máxima de medição de sucção do papel filtro Whatman n.º 42, sendo este de até 30Mpa (Carvalho, 2001).

A partir dos valores do teor de umidade em peso e do peso específico seco, pode-se determinar o teor de umidade volumétrica (assumindo-se que o solo não apresenta variação de volume significativa com valores de sucção) e assim determinar a curva característica de sucção em função da umidade calculada, conforme apresentado na Figura 49.

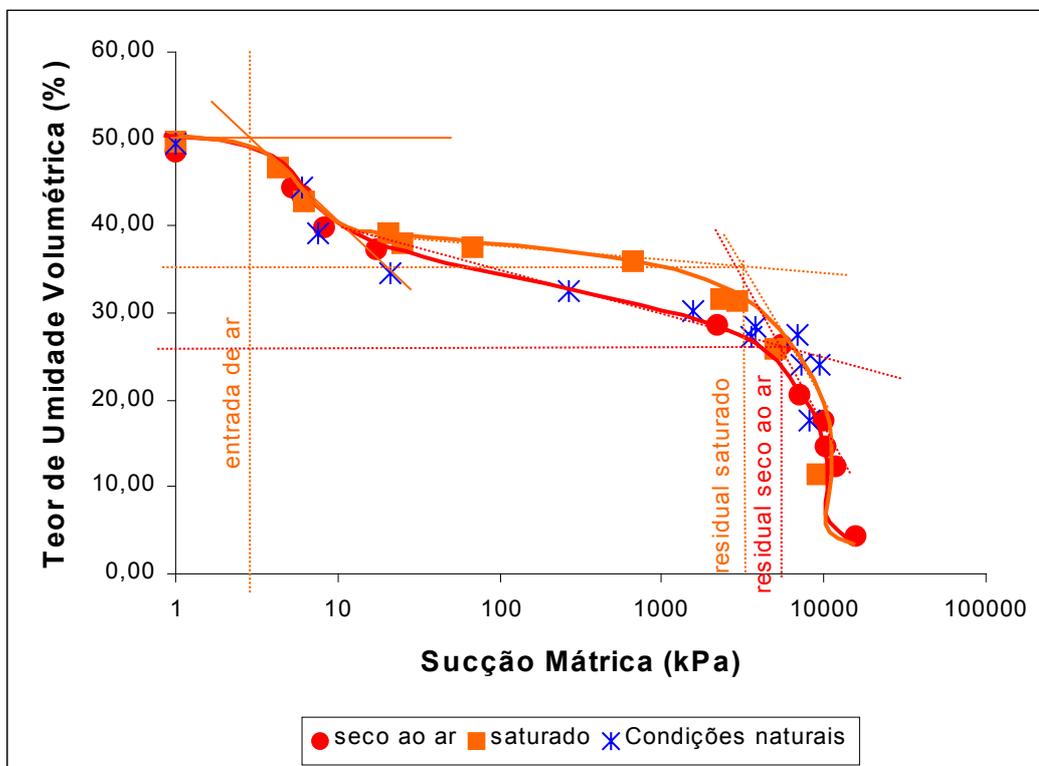


Figura 49- Curva característica em função do teor de umidade volumétrica

Os ensaios mostraram que a pressão de entrada de ar é muito baixa da ordem de 4 kPa. Este valor é obtido para um teor de umidade volumétrica de 50% tanto seguindo-se a trajetória de umidecimento como a de secagem. Um valor semelhante foi obtido por Beneveli (2002), da ordem de 10%, com o solo do Campo Experimental compactado estaticamente em laboratório.

O teor de umidade volumétrica residual é de 35% para um valor de sucção de 3200 kPa seguindo-se a trajetória de secagem, e, de 26% para um valor sucção de 5500 kPa, seguindo-se a trajetória de umidecimento. O teor de umidade volumétrica encontrada por Beneveli (op. cit.) foi de 29% para um valor de sucção de 6500kPa. Cabe ressaltar que a energia de compactação utilizada pelo citado autor era distinta da que aqui foi utilizada.

Outra forma de apresentar a curva característica é plotando a sucção mátrica em função do grau de saturação. Esta representação está ilustrada na Figura 50. Nota-se que as Figuras 48, 49 e 50, apresentaram um comportamento semelhante.

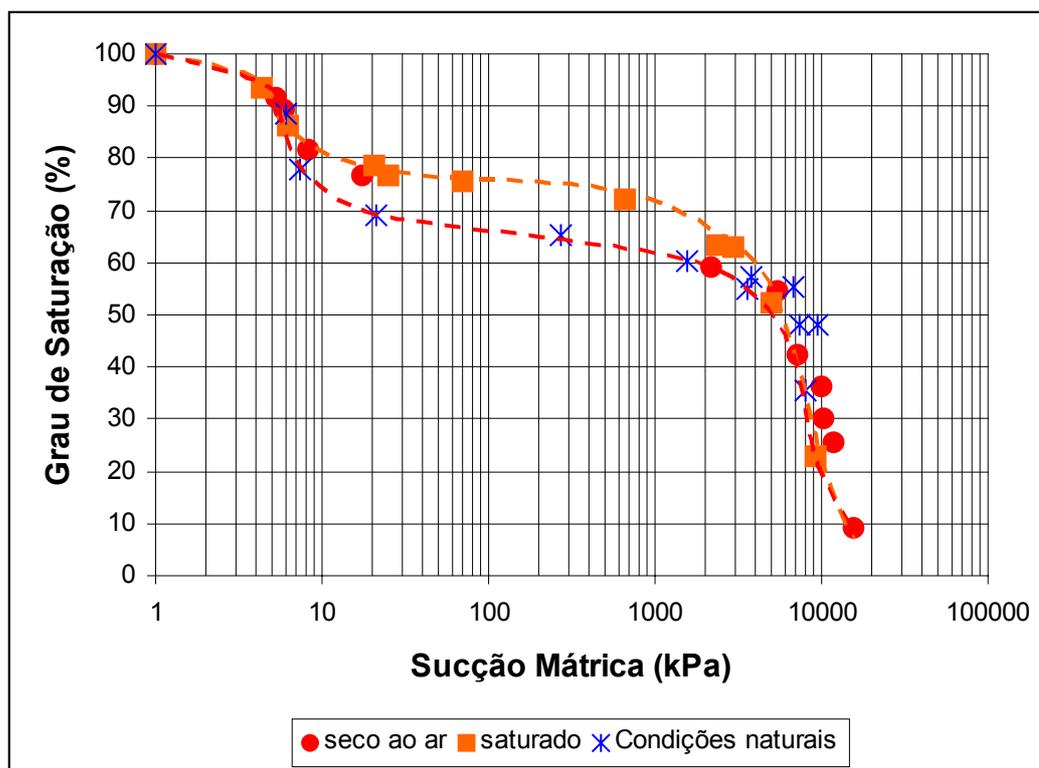
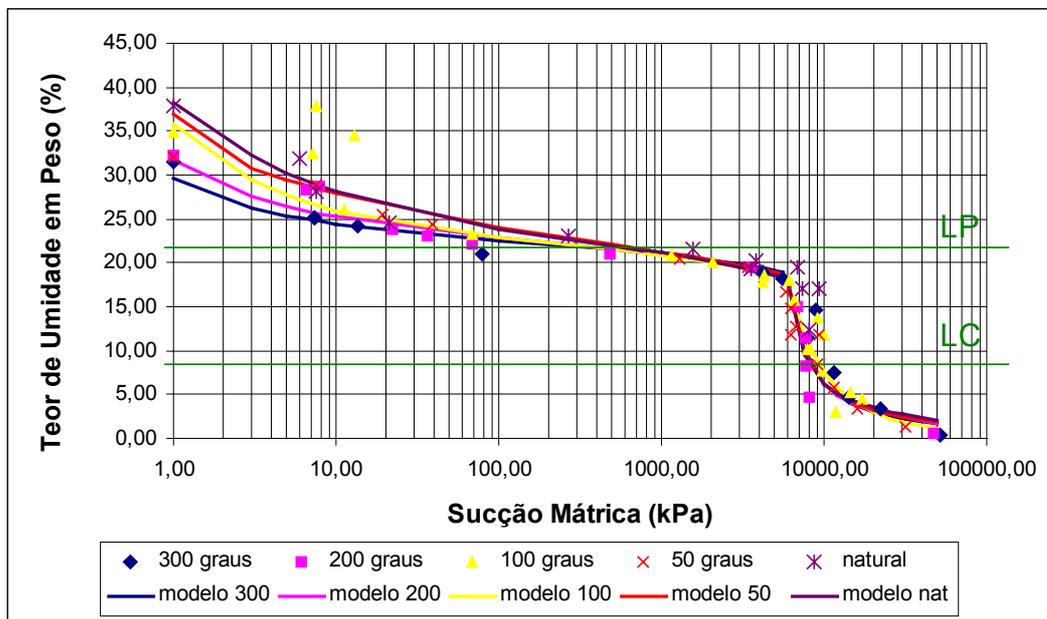


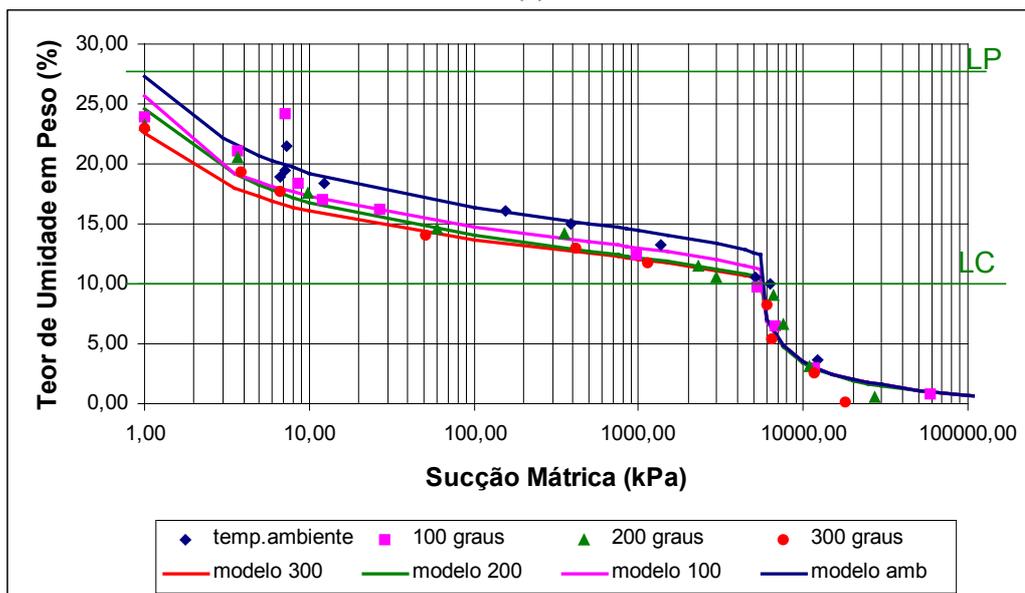
Figura 50- Curva característica em função do grau de saturação.

As curvas características, com relação a umidade gravimétrica obtidas levando-se em conta o efeito da temperatura, seguindo-se a trajetória de

umidescimento tanto para o solo do Campo Experimental como para o solo da Cidade dos Meninos, estão apresentadas na Figura 51.



(a)



(b)

Figura 51 –Curvas características em função do teor de umidade em peso para diferentes temperaturas: (a) solo do Campo Experimental - argiloso, (b) solo da Cidade dos Meninos - arenoso.

Através dessas curvas características fica claro a dependência do seu comportamento com a temperatura. A variação nas curvas características pode

estar relacionado com o padrão de microfissuramento do solo quando submetido a gradientes de temperatura.

No caso do solo do Campo Experimental observa-se que as curvas características se tornam única a partir da umidade de aproximadamente 22%, que é a umidade do limite de plasticidade. No limite de contração acontece o segundo ponto de inflexão da curva característica. Para o solo da Cidade dos Meninos a umidade saturada tem valor inferior ao do limite de plasticidade, mas as curvas características se tornam única a partir do limite de contração deste solo, que é de aproximadamente 10%.

Para ambos os solos a variação nas curvas características são mais sentidas para níveis baixos e médios dos valores de sucção, até o valor de 1000kPa para o solo do Campo Experimental e 5500 para o solo da Cidade dos Meninos.

As linhas cheias na Figura 51 foram obtidas através de equações de ajustes de curvas características propostas por Fredlund e Xing (1994), de acordo com:

$$\theta(\Psi, a, n, m) = C(\Psi) \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (81)$$

$$\text{sendo o fator de correção definido por; } C(\Psi) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1000000}{\Psi_r} \right)} \right], \quad (82)$$

e os parâmetros de ajuste das curvas:

$$a = \Psi_i, \quad m = 3,67 \ln \left[ \frac{\theta_s C(\Psi)}{\theta_i} \right], \quad n = \frac{1,31^{m+1}}{m \cdot \theta_s} 3,72 \left( \frac{\theta_i}{\Psi_p - \Psi_i} \right) \cdot \Psi_i, \quad (83)$$

onde:

$\theta_s$  – teor de umidade volumétrica saturado,

$\theta_r$  – teor de umidade volumétrica residual,

$\Psi_r$  – sucção correspondente à umidade volumétrica residual( $\theta_r$ ),

$\theta_i$  – teor de umidade volumétrica do ponto de inflexão,

$\Psi_i$  – sucção correspondente à umidade volumétrica do ponto de inflexão( $\theta_i$ ).

Para a Figura 51, utilizou-se as equações 81, 82 e 83, em termos de umidade gravimétrica. O comportamento dos solos em questão não é bem

ajustados por nenhum modelo pré existente, i.e. Fredlund e Xing (1994), van Genuchten (1980), Gardner (1958), dentre outros, devido ao segundo ponto de inflexão que existe para ambos os solos. A solução foi ajustar as equações para dois trechos distintos. O primeiro entre 0 e 6000 kPa, e o segundo a partir deste nível de sucção. As curvas foram ajustadas por intermédio do método dos mínimos quadrados, utilizando-se do SOLVER do software EXCEL. A Tabela 26 apresenta os parâmetros  $w_s$  (%),  $w_r$ (%),  $\Psi_r$ (kPa),  $w_i$ (%),  $\Psi_i$  (kPa), a, m, e, n, obtidos a partir dos ajustes das curvas do solo do Campo Experimental, apresentados na Figura 51. Já a Tabela 27 apresenta os mesmos parâmetros  $w_s$  (%),  $w_r$ (%),  $\Psi_r$ (kPa),  $w_i$ (%),  $\Psi_i$  (kPa), a, m, e, n, obtidos a partir dos ajustes das curvas do solo da Cidade dos Meninos, também apresentadas na Figura 51.

Tabela 26- Parâmetros das curvas características para o solo do Campo Experimental

T (°C)	Trecho	$w_s$ (%)	$w_r$ (%)	$\Psi_r$ (kPa)	$w_i$ (%)	$\Psi_i$ (kPa)	a	m	n
Sem	Até 6000kPa	38,0	19,0	9000	31,0	7,0	1,0	0,25	1,02
	Após 6000kPa	19,0	4,0	15000	16,0	8000	5850,0	0,55	10,1
50	Até 6000kPa	37,0	20,0	8000,0	24,0	4,0	4,2	0,29	0,32
	Após 6000kPa	20,0	4,0	15000	16,0	1100	5600	0,74	6,51
100	Até 6000kPa	36,0	19,0	8000	29,0	5,0	1,8	0,15	1,53
	Após 6000kPa	19,0	4,0	15000	16,0	8000	4300	1,71	5,14
200	Até 6000kPa	32,5	20,0	8000	30,0	3,0	0,90	0,15	1,30
	Após 6000kPa	20,0	4,9	15000	16,0	8000,0	5600	0,76	6,54
300	Até 6000kPa	30,0	20,0	10500	24,0	2,0	2,0	0,13	1,17
	Após 6000kPa	20,0	4,0	15000	16,0	8000,0	5450,0	0,84	5,23

Tabela 27- Parâmetros das curvas características para o solo da Cidade dos Meninos

T (°C)	Trecho	$w_s$ (%)	$w_r$ (%)	$\Psi_r$ (kPa)	$w_i$ (%)	$\Psi_i$ (kPa)	a	m	n
Sem	Até 6000kPa	26,0	13,5	8000	22,0	2,0	0,8	0,26	0,93
	Após 6000kPa	13,5	2,0	12000	16,0	8000	4000	0,81	7,12
100	Até 6000kPa	24,0	12,0	8000	21,0	2,0	0,8	0,27	0,92
	Após 6000kPa	12,0	2,0	12000	16,0	8000	4000	0,81	7,32
200	Até 6000kPa	23,0	11,0	8000	21,0	2,0	0,7	0,32	0,97
	Após 6000kPa	11,0	2,0	12000	16	8000	4000	0,86	7,43
300	Até 6000kPa	22,5	11,0	8000	22,0	2,0	0,5	0,28	1,5
	Após 6000kPa	11,0	2,0	12000	16	80000	4000	0,81	7,12

A determinação das umidades saturadas e residuais foi efetuada da mesma maneira da apresentada na Figura 49, não se repetindo na Figura 51 para que esta não ficasse carregada. Observa-se que  $w_s$  (umidade gravimétrica saturada) para ambos os solos diminuiu com a temperatura, de 38% para 30 % para o solo do Campo Experimental, e, de 26% para 22,5%, para o solo da Cidade dos Meninos. Esta diminuição da umidade gravimétrica saturada com a temperatura, está

relacionada com a perda de condição de absorção de água, anteriormente observada, devido a precipitação de ferro e alumínio que bloqueiam as posições dos cátions trocáveis, diminuindo a sua capacidade de absorção de água. Os dois pontos de inflexão,  $w_{r1}$  e  $w_{r2}$  (umidade gravimétrica residual) mantiveram-se praticamente inalterados, sendo de 20% e 4% para o solo do Campo Experimental. Já para o solo da Cidade dos Meninos o primeiro ponto de inflexão sofreu uma pequena redução com a temperatura, de 12,5% para 10%, mantendo-se inalterado o segundo ponto de inflexão em 2%, mostrando que os efeitos da temperatura são sentidos somente para níveis de sucção mais baixos.

Realizou-se a contagem de poros, por área, através da análise de lâminas, preparadas para estudos de micromorfologia do solo, para corpos de prova que não foram aquecidos e que foram submetidos a temperatura de 300°C. As características mais importantes da porosidade são tamanho, arranjo e continuidade dos poros. A contagem foi feita levando em conta o esqueleto e o plasma, que são a parte granular e a parte fina do solo, respectivamente, e os macroporos (50 a 300 $\mu$ m) e os microporos (0,2 a 30  $\mu$ m).

A percentagem de esqueleto se manteve inalterada com a temperatura, o que já era esperado por ser esta a parte inerte à temperatura, da ordem de 23,5% para o Campo Experimental e de 45% para o solo da Cidade dos Meninos. O maior percentual de esqueleto para o solo da Cidade dos Meninos é devido ao fato deste solo ser arenoso. O percentual de Plasma (solo fino) apresentou uma diminuição discreta com a temperatura, para o solo do Campo Experimental, de 58% para 53,5%, indicando que houve uma pequena amorfização do mesmo, estando este fato de acordo com a amorfização do argilo-mineral com a temperatura encontrado nas análises de Raios X, conforme apresentado na Figura 11, do Capítulo 5. Para o solo da Cidade dos Meninos não houve variação percentual do plasma com a temperatura.

Quanto a porosidade para o solo do Campo Experimental a macroporosidade teve um aumento discreto com a temperatura de 8% para 9%, enquanto que o percentual de microporos apresentou um aumento mais significativo, de aproximadamente 8,5% para 14%. O solo da Cidade dos Meninos, teve um comportamento semelhante ao do Campo Experimental, variando quanto a macroporosidade de 6,6% para 7,7%, e, apresentando uma variação menor da microporosidade, com a temperatura de 9,9 para 12%. Estes

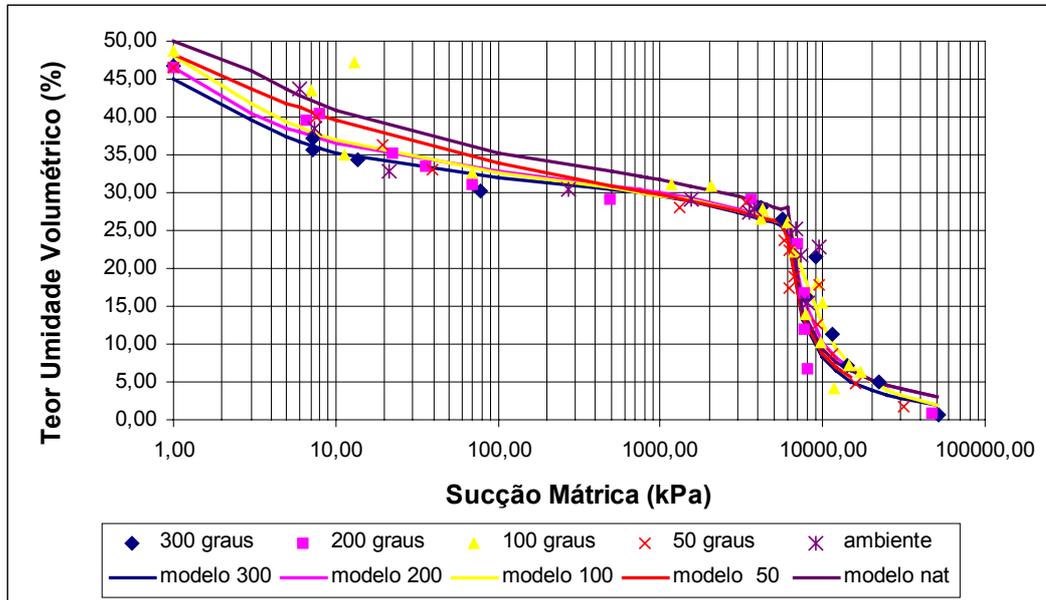
resultados vem a mostrar que a variação nas curvas características com a temperatura está intimamente ligada com o aumento de poros, e mais que este aumento é mais sentido nos microporos, ressaltando o aparecimento de microfissuras, conforme as observadas nas imagens das lâminas anteriormente apresentadas na Figura 37. Este padrão de comportamento também influenciou na variação da condutividade hidráulica dos corpos de prova, aquecidos e ensaiados à temperatura ambiente.

Comparando-se as curvas características extremas, sem variação de temperatura e a curva 300°C, vê-se que a variação máxima entre os valores de umidade gravimétrica para uma dada sucção é da ordem de 20%, para o solo do Campo Experimental, e 17% para o solo da Cidade dos Meninos. Para o solo do Campo Experimental esta diferença tende a diminuir com o aumento da sucção, até que as curvas ficam coincidentes a partir 1000kPa. As curvas características do solo da Cidade dos Meninos caminham paralelas até o nível de sucção de 5500kPa. A maior variação percentual entre as curvas características do solo do Campo Experimental, está totalmente de acordo com a contagem de macroporos e microporos para solo a temperatura ambiente, e aquecido a 300°C, uma vez que para o solo do Campo Experimental a percentagem de aumento de microporos foi maior do que para o solo da Cidade dos Meninos.

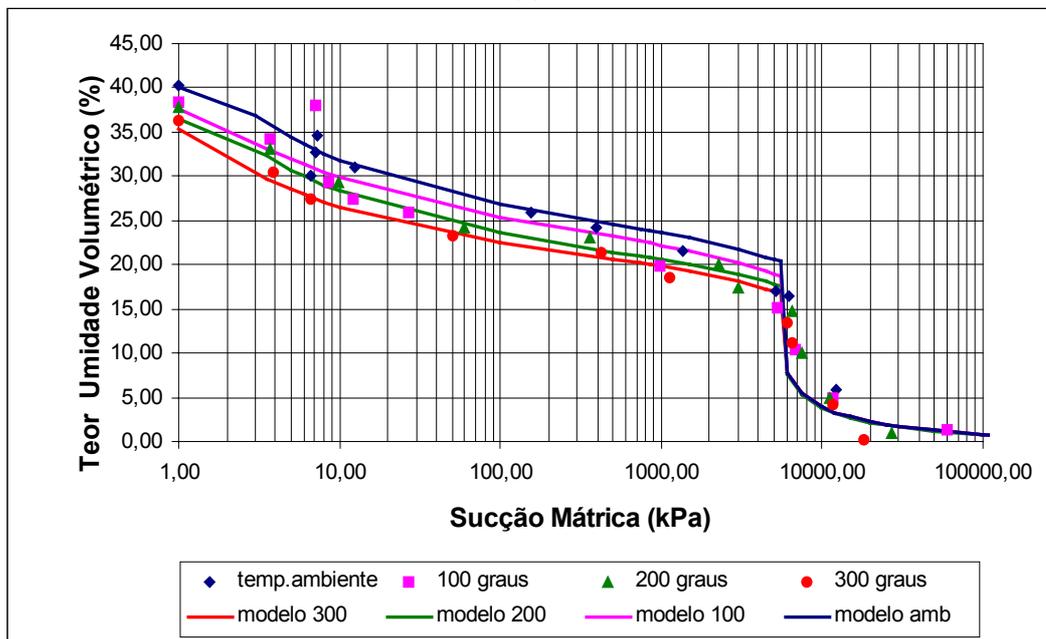
Os resultados aqui encontrados estão de acordo com a literatura, segundo por exemplo Hopmans e Dane (1986), que estudaram o comportamento das curvas características de uma areia superficial, em uma placa de pressão com temperatura controlada, concluindo que há uma alteração no comportamento das curvas características quando ocorre o aumento da temperatura. Romero et al.(2001) apresentaram um estudo experimental em argilas não saturadas com relação ao efeito da temperatura, nas curvas características de sucção. Os ensaios, foram realizados em uma célula oedométrica com pressões e temperaturas controladas e mostraram que a temperatura tende a diminuir a sucção total, conforme o comportamento aqui encontrado. A variação de temperatura imposta foi na faixa de 22°C a 80°C, sendo que a redução encontrada na sucção é constante para toda a curva característica.

Determinou-se por correlações o teor de umidade volumétrica, assumindo-se que o solo não apresenta variação de volume significativo com valores de sucção. Com esses valores plotou-se a curva característica de sucção em função da

umidade volumétrica. Os resultados estão apresentados na Figura 52. Essas novas curvas características também foram ajustadas pelas equações 81, 82 e 83, dividindo-se as curvas novamente em dois trechos, até 6000kPa.



(a)



(b)

Figura 52- Curva característica em função do teor de umidade volumétrica para corpos de prova submetidos a diferentes gradientes de temperaturas: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.

Conforme pode se observar nas Figuras 51 e 52 existem pontos que não estão de acordo com o padrão de comportamento observado, cujos pontos são

erros experimentais, ressaltando a grande importância do uso de balanças de quatro casas decimais na determinação da umidade gravimétrica do papel filtro. Deve sempre se determinar o maior número possível de pontos numa curva característica, de modo que os erros experimentais possam ser detectados e tratados como anomalias para que não afetem a tendência do ensaio, facilitando assim a sua interpretação.

As Tabelas 28 e 29 apresentam os parâmetros das curvas características ajustadas com relação à umidade volumétrica para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos.

Tabela 28- Parâmetros das curvas características x umidade volumétrica para o solo do Campo Experimental.

T (°C)	Trecho	$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)	$\Psi_r$ (kPa)	$\theta_i$ (%)	$\Psi_i$ (kPa)	a	m	n
Sem	Até 6000kPa	50	25,0	5500,0	47,0	7,0	2,0	0,19	0,91
	Após 6000kPa	25,0	2,5	12000,0	25,0	8000,0	5850	0,55	10,2
50	Até 6000kPa	48,0	25,0	5500,0	45,0	4,0	4,0	0,29	0,38
	Após 6000kPa	25,0	2,5	12000,0	27,0	7500,0	5600,0	0,73	6,50
100	Até 6000kPa	47,0	24,5	5800,0	44,0	5,0	1,23	0,17	1,50
	Após 6000kPa	24,5	2,5	12000,0	28,0	8000,0	4300,0	1,70	5,00
200	Até 6000kPa	46,0	25,0	6000,0	43,0	3,0	0,90	0,16	1,50
	Após 6000kPa	25,0	2,5	12000,0	28,0	8000,0	5600,0	0,71	6,50
300	Até 6000kPa	45,0	24,8	5500,0	38,0	2,0	2,0	0,13	1,90
	Após 6000kPa	24,8	2,5	12000,0	23,0	8000,0	5450	0,80	5,00

Tabela 29- Parâmetros das curvas características x umidade volumétrica para o solo da Cidade dos Meninos.

T (°C)	Trecho	$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)	$\Psi_r$ (kPa)	$\theta_i$ (%)	$\Psi_i$ (kPa)	a	m	n
Sem	Até 6000kPa	40	22,0	5500,0	38,0	2,0	0,8	0,27	0,90
	Após 6000kPa	22,0	1,0	12000,0	18,0	5500,0	4000,0	0,80	7,00
100	Até 6000kPa	38,0	18,0	6000,0	36,0	2,0	0,8	0,27	0,9
	Após 6000kPa	18,0	1,0	12000,0	18,0	5000,0	4000,0	0,80	7,00
200	Até 6000kPa	36,0	17,0	5700,0	35,0	2,0	0,70	0,31	0,90
	Após 6000kPa	17,0	1,0	12000,0	18,0	5000,0	4000,0	0,80	7,00
300	Até 6000kPa	35,0	16,0	5500,0	36,0	2,0	0,5	0,28	1,20
	Após 6000kPa	16,0	1,0	12000,0	18,0	5000,0	4000,0	0,80	7,00

Observa-se que  $\theta_s$  (umidade volumétrica saturada) para ambos os solos diminuiu com a temperatura, de 50% para 45 % para o solo do Campo Experimental e de 40% para 35,4%, para o solo da Cidade dos Meninos. Os dois pontos de inflexão,  $w_{r1}$  e  $w_{r2}$  (umidade gravimétrica residual) mantiveram-se praticamente inalterados, sendo de 26% e 10% para o solo do Campo Experimental, enquanto que para o solo da Cidade dos Meninos o primeiro ponto

de inflexão sofreu uma pequena redução com a temperatura, de 20% para 16,5%, mantendo-se inalterado o segundo ponto em 7,5%.

A variação das curvas características com a temperatura apresentou o mesmo padrão de comportamento para o solo o Campo Experimental. A diferença para baixas sucções são maiores do que para altas sucções até que todas as curvas se tornem únicas no primeiro ponto de inflexão, seguindo como uma única curva até a umidade volumétrica residual. Já para o solo da Cidade dos Meninos a diferença se mantém constante até o primeiro ponto de inflexão, se transformando daí para frente em uma curva única até a umidade volumétrica residual.

Marinho (1994) afirmou que quanto mais plástico um solo maior será a sua umidade para uma dada sucção. De acordo com os estudos realizados até o momento sabe-se que o aumento de temperatura diminui a plasticidade do solo, conforme constatado no Capítulo 5. Conclui-se que o aumento de temperatura, que fez com que a umidade diminuísse para uma dada sucção, está de acordo com a sua diminuição de plasticidade.

Considerando-se a umidade volumétrica, a diferença entre as curvas características parecem diminuir. Para o solo do Campo Experimental a diferença passa a ser de 10% e de 12% para o solo da Cidade dos Meninos, diminuições estas significativas. Como a umidade medida é a gravimétrica e a umidade volumétrica é retirada de uma relação, acredita-se que a diferença mais correta é a dada pela umidade gravimétrica. As curvas de sucção versus grau de saturação estão apresentadas no Apêndice D, para não tornar o texto repetitivo.

As curvas características das Figuras 51 e 52 foram determinadas seguindo-se a trajetória de umedecimento. Para melhor verificar o efeito da temperatura no solo, determinaram-se curvas características seguindo-se trajetórias de secagem, desta vez somente para o solo do Campo Experimental. Após os corpos de provas serem moldados, eram submetidos a acréscimos de temperatura (100°C e 300°C) por oito horas dentro da mufla. Quando retirados, eram saturados e deixados secar ao ar por intervalos diferentes de tempo. A Figura 53 apresenta as curvas características em função da umidade em peso. As curvas características foram ajustadas pelas equações 81, 82 e 83, propostas por Fredlund e Xang (1994). Os parâmetros ajustados para estas curvas estão apresentados na Tabela 30.

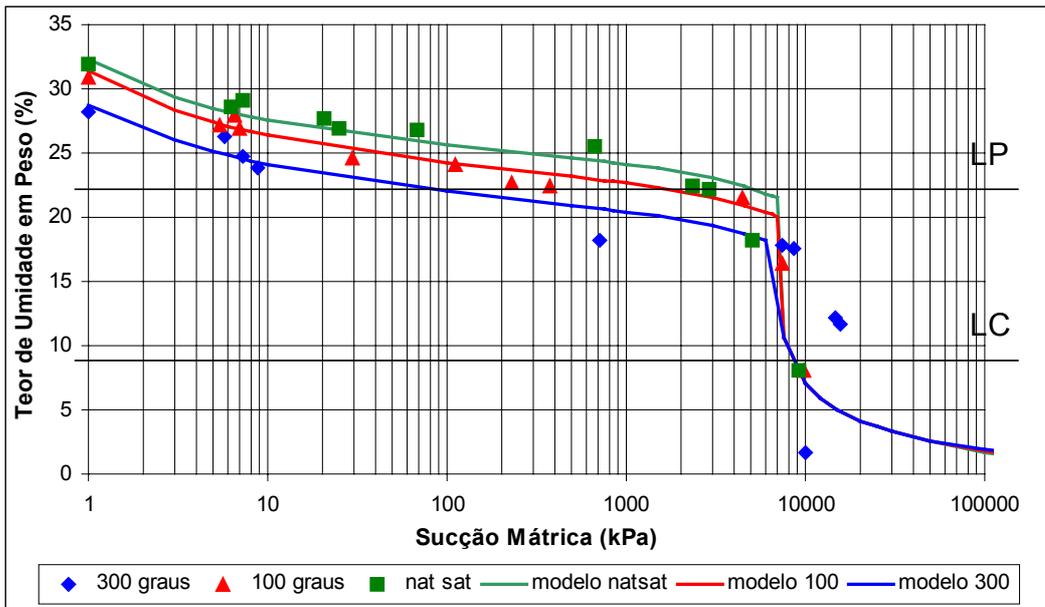


Figura 53 – Curvas características da Campo Experimental em função do teor de umidade em peso para diferentes temperaturas seguindo-se a trajetória de secagem.

Tabela 30- Parâmetros das curvas características seguindo-se a trajetória de secagem para o solo do Campo Experimental.

T (°C)	Trecho	$\omega_s$ (%)	$\omega_r$ (%)	$\Psi_r$ (kPa)	$\omega_i$ (%)	$\Psi_i$ (kPa)	a	m	n
Sem	Até 6000kPa	32	22,0	5500,0	30,0	6,0	2,0	0,09	1,00
	Após 6000kPa	22,0	4,0	15000,0	18,0	10000,0	6000,0	0,50	10,0
100	Até 6000kPa	30,5	21,5	6000,0	28	6,0	1,2	0,12	1,00
	Após 6000kPa	21,5	4,0	15000,0	18,0	10000,0	6000,0	0,50	10,0
300	Até 6000kPa	28,5	19,0	7000,0	26,0	6,0	0,8	0,15	0,80
	Após 6000kPa	19,0	4,0	15000,0	18,0	10000,0	6000,0	0,50	10,0

As trajetórias de secagem se mostraram também sensíveis a variação de temperatura. A variação máxima entre o teor de umidade em peso em um dado nível de sucção à temperatura ambiente e o teor de umidade em peso para corpos de prova submetidos a 300°C foi da ordem de 15%, estando de acordo com a variação para a trajetória de umedecimento. O efeito da histerese pode ser observado. Outra observação interessante é que a variação da temperatura fez com que as curvas características de sucção se deslocassem para baixo, mais diferentemente das trajetórias de umedecimento deste solo, conforme pode ser visto na Figura 51(a). As curvas características seguiram paralelas até o nível de sucção de 7000kPa, quando passaram a ser coincidentes. Novamente o limite de plasticidade está associado com o primeiro ponto de inflexão e o limite de contração com o segundo.

A umidade gravimétrica saturada, novamente apresentou uma diminuição em relação à temperatura, de 32% para 28,5 %, só que desta vez uma diminuição menor do que a observada na trajetória de umidecimento. O primeiro ponto de inflexão,  $w_{r1}$ , foi reduzido com o aumento de temperatura, de 21% para 18%, sendo que este comportamento também não havia sido observado para as trajetórias de umidecimento. O segundo ponto de inflexão,  $w_{r2}$ , se manteve constante em 9% independentemente do aumento de temperatura.

As diferenças entre as trajetórias de umidecimento e de secagem estão relacionadas com o fenômeno de histerese que apresentam as curvas características. A histerese decorre do efeito de *ink bottle*, que está relacionado com o fato do ângulo de contato ser maior no umidecimento do que na secagem, e o possível aprisionamento do ar no umidecimento.

### 7.3.1

#### Curvas de Condutividade Hidráulica Não Saturada

Van Genuchten (1980) propôs uma relação que permitem obter a curva de condutividade hidráulica não saturada com base nos dados da curva característica de sucção e a condutividade hidráulica saturada, determinados em laboratório.

Para se usar essas relações, o primeiro passo é ajustar os dados da curva característica à equação proposta pelo referido autor:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \cdot \Psi)^n} \right]^m \quad (84)$$

onde:  $\theta_s$  – teor de umidade volumétrica saturado,

$\theta_r$  – teor de umidade volumétrica residual,

$\Psi$  - sucção

$\alpha$ ,  $n$  e  $m$  – parâmetros de ajuste da curva

Após a obtenção dos parâmetros de ajuste da curva característica, a condutividade hidráulica não saturada é dada por:

$$k(\theta) = \begin{cases} k_s \cdot k_r & \text{para } S < 100\% \\ k_s & \text{para } S = 100\% \end{cases} \quad (85)$$

respectivamente onde:

$k_s$  – condutividade hidráulica saturada:

$$k_r = S_e^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/n} \right)^m \right]^2 \quad (86)$$

onde os parâmetros  $m$  e  $S_e$  são dados por:

$$m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \quad (87)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (88)$$

O ajuste das curvas características foram feitos pelo método numérico de ajuste de curvas de mínimos quadrados utilizando-se do SOLVER do software EXCEL, onde o valor de  $\theta_s$ ,  $k_s$  são fixos e os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $\theta_r$  são calculados pelo ajuste de maneira iterativa.

Foram utilizados os valores de condutividade hidráulica saturada do item 7.1 e os dados das curvas características do item 7.3.1. Os valores dos parâmetros ajustados obtidos estão listados na Tabela 31.

Tabela 31- Parâmetros das equações de Van Genuchten.

T (°C)	Campo Experimental						Cidade dos Meninos					
	$k_s$ (m/s)	$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)	$\alpha$ (kPa) <sup>-1</sup>	n	m	$K_s$ (m/s)	$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)	$\alpha$ (kPa) <sup>-1</sup>	n	m
Sem	6,15 x10 <sup>-7</sup>	50	0	0,36	1,12	0,11	8,11x 10 <sup>-7</sup>	40	0	0,28	1,14	0,12
50	1,73 x10 <sup>-6</sup>	48	0	0,30	1,15	0,13						
100	2,26 x10 <sup>-6</sup>	47	0	0,22	1,14	0,12	3,00x 10 <sup>-6</sup>	38	0	0,19	1,18	0,15
200	3,35 x10 <sup>-6</sup>	46	0	0,17	1,15	0,13	4,03x 10 <sup>-6</sup>	36	0	0,22	1,16	0,14
300	4,64 x10 <sup>-6</sup>	45	0	0,17	1,13	0,11	6,95 x10 <sup>-6</sup>	35	0	0,25	1,18	0,15

As curvas características e de condutividades hidráulicas não saturadas obtidas para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos estão apresentadas na Figura 54 e 55 respectivamente. Para o ajuste da curva característica do Campo Experimental utilizou-se de todos os dados obtidos independentemente da trajetória de umedecimento ou de secagem.

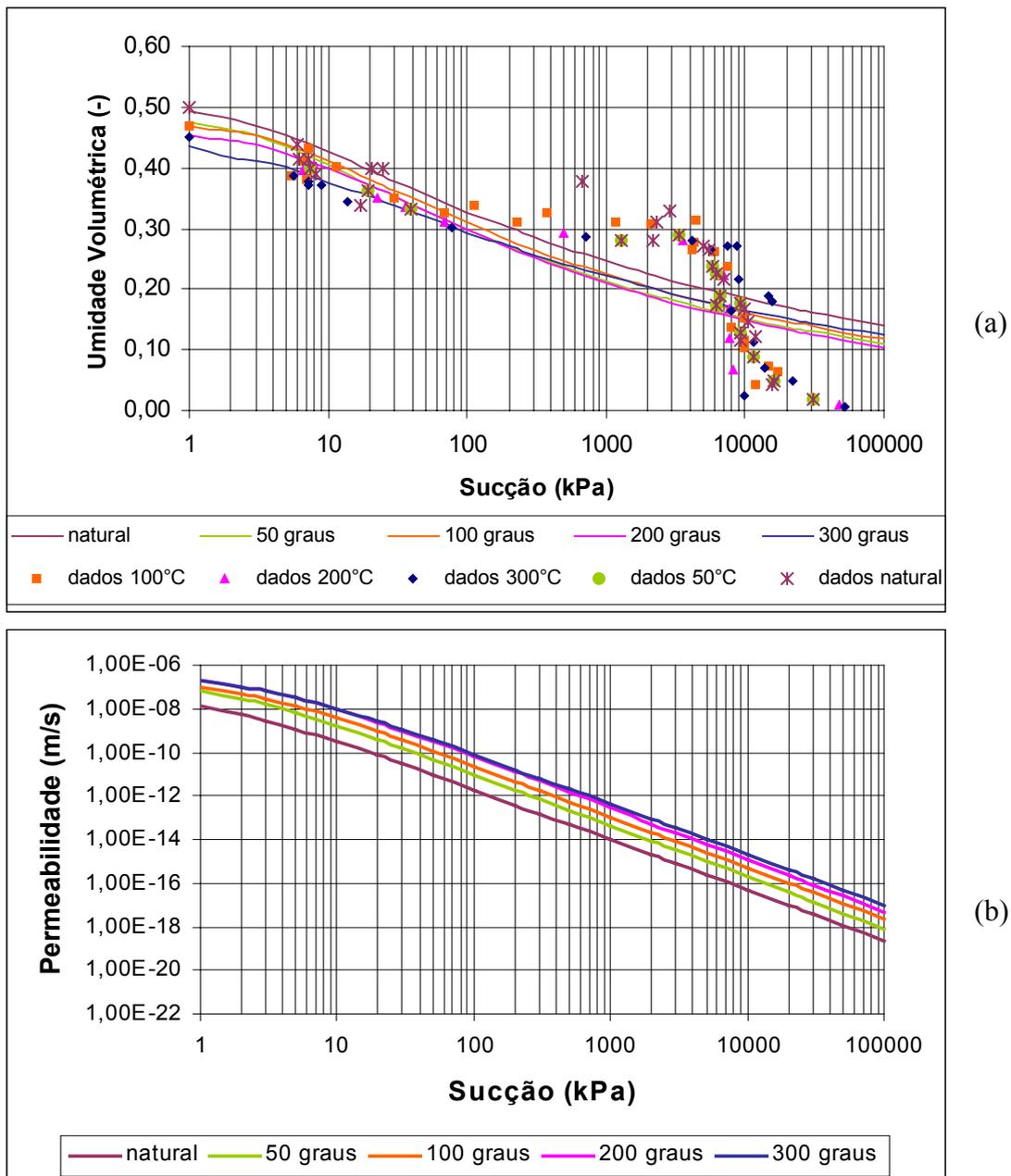


Figura 54 –Curvas obtidas para o solo do Campo Experimental: (a) Curva Característica, (b) Condutividade hidráulica não saturada.

Observa-se o mesmo padrão de comportamento com relação a temperatura com o resultado encontrado pelo ajuste proposto por Fredlund e Xing(1994), isto é a diminuição da umidade para uma dada sucção. Este modelo não consegue simular dos dois pontos de inflexão da curva característica, pode-se dizer que ele simula bem os dados até 100 kPa.

A condutividade hidráulica não saturada se demonstrou dependente da temperatura, o que já era esperado, pois sabíamos que a curva característica e a condutividade hidráulica saturadas eram afetadas pela mesma. No caso da curva

de condutividade hidráulica não saturada o aumento de temperatura faz com que a relação se desloque para cima, o que significa uma diminuição da condutividade hidráulica não saturada, com a temperatura.

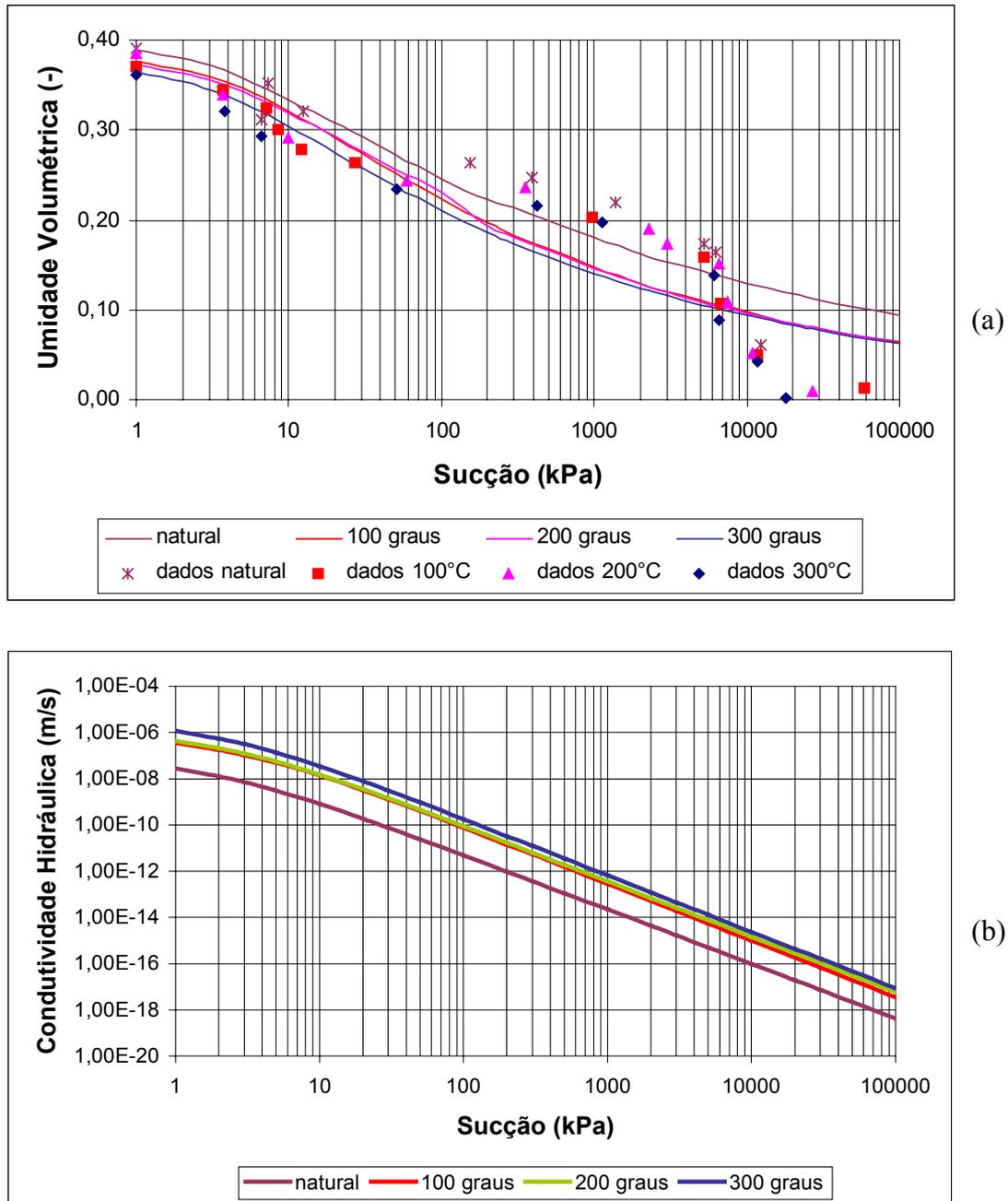


Figura 55 –Curvas obtidas para o solo da Cidade dos Meninos: (a) Curva Característica, (b) Condutividade hidráulica não saturada.

## 7.4

### Ensaio de Condutividade Hidráulica Saturado com Temperatura Controlada

Na determinação das condutividades hidráulicas com temperatura controlada utilizou-se o permeômetro desenvolvido para esta pesquisa na PUC-Rio, descrito no item 6.4. Os procedimentos utilizados para esta determinação estão descritos no item 6.4.1. A forma como este solo foi compactado está descrito no item 5.2.1

Foram realizados sete ensaios de condutividade hidráulica saturada com os corpos de prova submetidos a gradientes de temperatura, ao mesmo tempo que se ensaiava a condutividade hidráulica, tanto para o solo do Campo Experimental como para o solo da Cidade dos Meninos. Os dados iniciais dos corpos de prova utilizados nos ensaios estão apresentados nas Tabelas 32 e 33 respectivamente.

Tabela 32 – Dados de cada corpo de prova ensaiados do solo do Campo Experimental

Ensaio	Temp. (°C)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	e inicial	Parâmetro B	Condutividade hidráulica (m/s)
01	20,89	16,88	13,78	22,52	0,97	1,00	$1,09 \times 10^{-7}$
02	30,49	16,58	13,64	21,57	0,99	0,97	$1,90 \times 10^{-7}$
03	40,35	16,46	13,53	21,58	0,97	0,98	$4,11 \times 10^{-7}$
04	50,57	16,85	13,82	21,93	0,95	0,99	$5,92 \times 10^{-7}$
05	60,19	16,66	13,64	22,14	0,99	0,99	$8,25 \times 10^{-7}$
06	68,89	16,60	13,56	22,45	0,97	0,98	$1,37 \times 10^{-6}$
07	77,48	16,72	13,64	22,55	0,95	0,99	$2,50 \times 10^{-6}$

Tabela 33 – Dados de cada corpo de prova ensaiados do solo da Cidade dos Meninos.

Ensaio	Temp. (°C)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	Parâmetro B	Condutividade hidráulica (m/s)
01	21,94	19,27	16,28	18,37	0,60	0,98	$2,64 \times 10^{-7}$
02	30,74	19,26	16,28	18,29	0,59	0,99	$3,55 \times 10^{-7}$
03	40,96	19,29	16,30	18,37	0,59	0,99	$6,53 \times 10^{-7}$
04	51,42	19,32	16,29	18,58	0,59	0,97	$9,51 \times 10^{-7}$
05	61,95	19,18	16,24	18,10	0,60	1,00	$1,22 \times 10^{-6}$
06	69,76	19,25	16,25	18,47	0,60	1,00	$1,55 \times 10^{-6}$
07	77,52	19,30	16,26	18,70	0,60	0,99	$1,89 \times 10^{-6}$

Utilizou-se gradientes hidráulicos entre 11 e 12, para a execução destes ensaios. A Figura 56 mostra as curvas de variação de volume percolado, do gradiente hidráulico, da condutividade hidráulica e da temperatura com o tempo, tomando como exemplo o ensaio do solo do Campo Experimental ensaiado a temperatura de 40°C. Da curva de volume percolado com o tempo retira-se a

vazão, equação apresentada na Figura 56(a) Nota-se através das Figuras 56(b), 56(c) e 56(d), que o gradiente hidráulico, a condutividade hidráulica e a temperatura se mantiveram praticamente constante ao longo do ensaio. As curvas traçadas para os demais ensaios se encontram no Apêndice B.

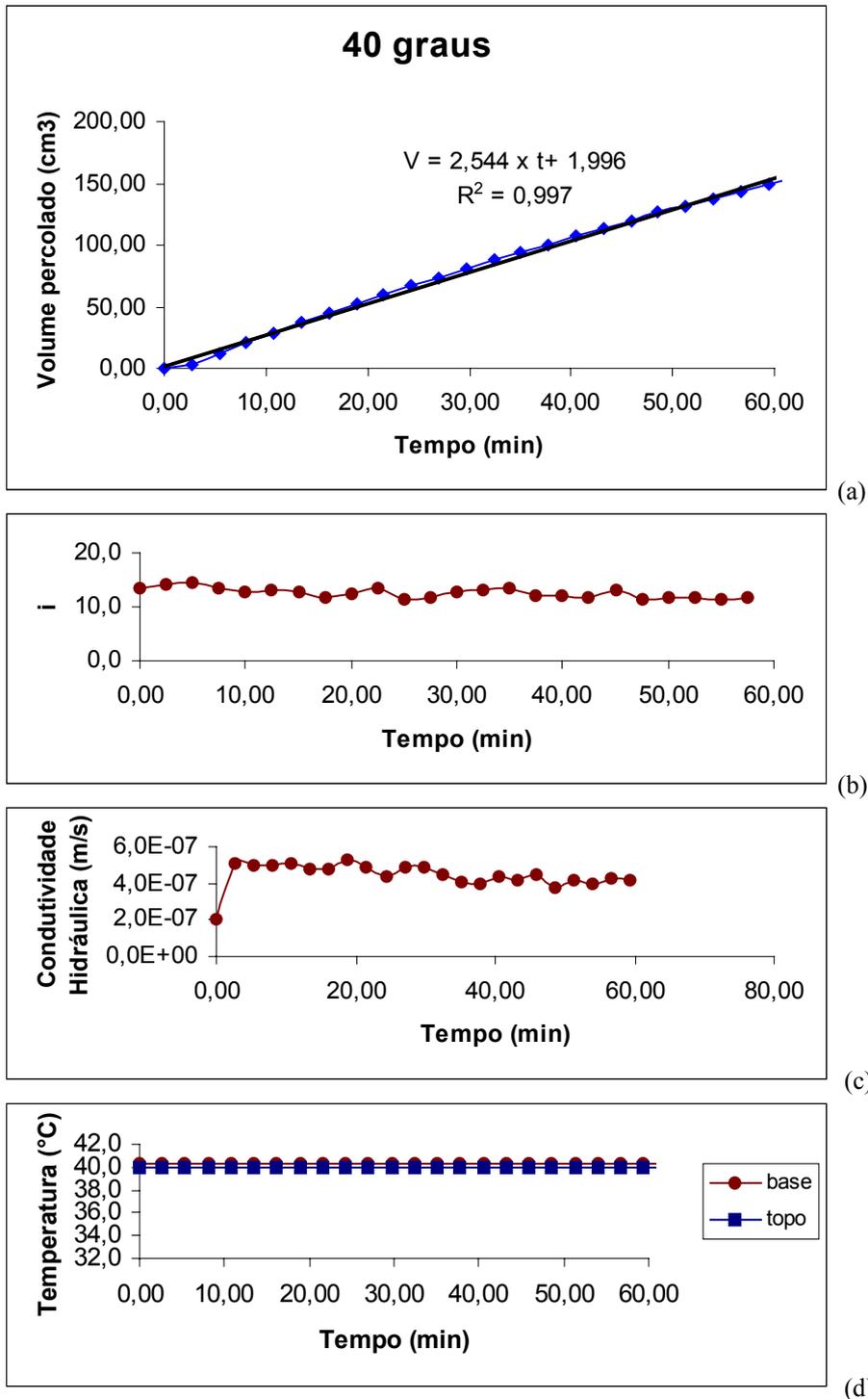


Figura 56 – Ensaio de condutividade hidráulica da amostra do Campo Experimental à 40°C: (a) variação de volume com o tempo; (b) variação do gradiente hidráulico com o tempo; (c) variação da condutividade hidráulica com o tempo; (d) variação da temperatura com o tempo.

Nas Tabelas 32 e 33 estão incluídos os valores dos coeficientes de condutividades hidráulicas obtidos ensaiando-se os corpos de prova com diferentes temperaturas. A variação deste coeficiente com a temperatura está plotada na Figura 57. Nesta mesma Figura é apresentada a equação que melhor representa o padrão de comportamento das condutividades hidráulicas com a temperatura para ambos os solos.

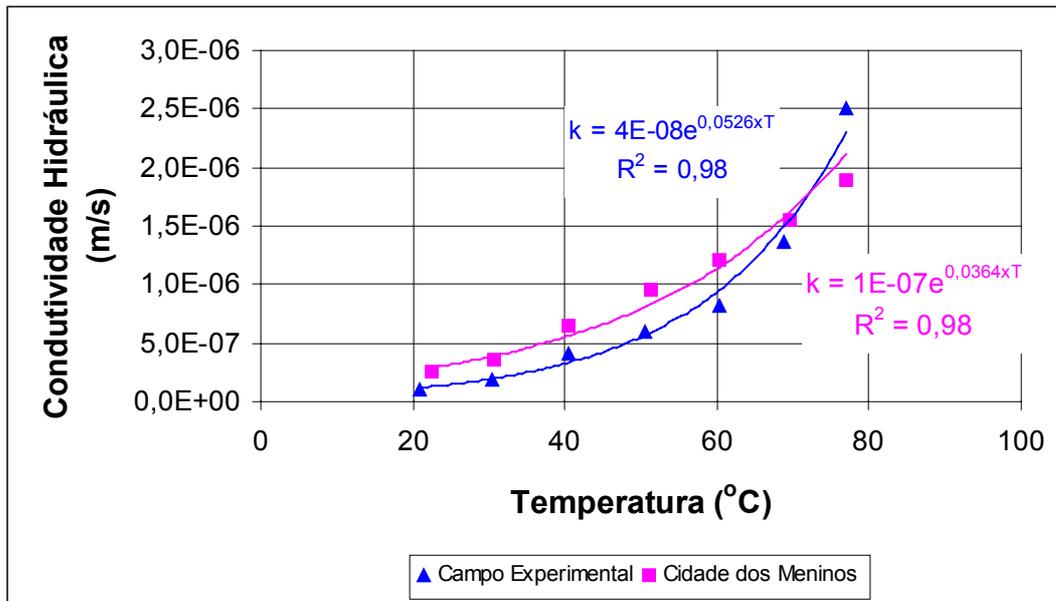


Figura 57 – Variação da condutividade hidráulica com a temperatura.

Para este ensaio não somente os corpos de prova sofrem acréscimo de temperatura, mas também o fluido permeante também é aquecido, alterando-se assim seus valores de peso específico e viscosidade. Pela equação de Taylor (equação 74), a condutividade hidráulica depende do peso específico e da viscosidade do líquido. O padrão exponencial da Figura 57 está de acordo com a forma de variação da viscosidade da água com a temperatura. Com o intuito de se verificar a variação da condutividade hidráulica desprezando-se os efeitos da temperatura no líquido permeante, calculou-se a condutividade hidráulica intrínseca, pela relação:

$$k_{20} = k \cdot \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (88)$$

onde:  $k$  – condutividade hidráulica na temperatura do ensaio;  $\mu_{20}$  - viscosidade da água a 20°C;  $\mu$  - viscosidade da água na temperatura do ensaio.

Com os valores de condutividade hidráulica intrínseca traçou-se o gráfico da Figura 58. Nota-se que a variação da permeabilidade intrínseca com a temperatura perde o aspecto exponencial e volta a ser uma relação linear conforme o que se encontrou no item 7.1. Estes resultados sugerem que outros fatores afetam a variação da condutividade hidráulica com a temperatura, incluindo o índice de vazios e o fator de forma  $C$ . A variação da condutividade hidráulica com a temperatura é um pouco maior para o solo do Campo Experimental do que para o solo da Cidade dos Meninos. Este padrão de comportamento já havia sido observado nos ensaios de condutividade hidráulica da matriz de solo aquecida ensaiada a temperatura ambiente, ensaios do item 7.1, estando esta variação na mesma ordem de grandeza do que a agora observada. As análises de macro e micro porosidade do solo do Campo Experimental com a temperatura também apresentaram uma maior variação do que a do solo da Cidade dos Meninos, ressaltando mais uma vez a relevância da temperatura na estrutura do solo.

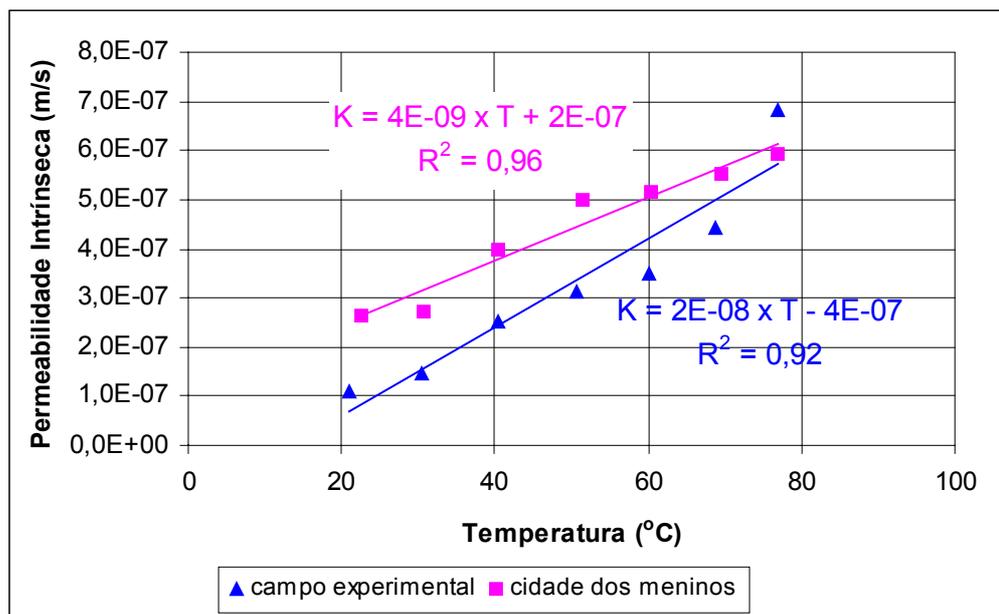


Figura 58- Variação da condutividade hidráulica intrínseca com a temperatura.

Este aumento da condutividade hidráulica com a temperatura já havia sido observado por outros autores, tais como Towhata et al. (1993) que a partir de ensaios de adensamento com argila e bentonita aquecidas até 90°C, estimou a relação da condutividade hidráulica com a temperatura, concluindo a permeabilidade intrínseca aumentava com a mesma, ainda que se elimina-se o

efeito da temperatura no fluido permeante. Os autores afirmam que o aumento na condutividade hidráulica não pode ser completamente atribuído a natureza do fluido permeante, e que deve existir algum efeito adicional na estrutura de um solo argiloso que leve a este aumento. Marques (1996) também concluiu que a condutividade hidráulica é crescente com o aumento de temperatura.

Rabe et al.(2003) e Rabe (1998) concluíram em seus ensaios, com um solo residual maduro e uma argila mole, que a condutividade hidráulica não tinha uma variação significativa com a temperatura. Os referidos autores trabalharam com faixa de temperatura entre 20°C e 70°C. Esta afirmação não está compatível com o esperado e nem com a literatura, e isto pode ser devido a obtenção da condutividade hidráulica através de correlações e não medida diretamente.

de Campos (1979) apresentou uma relação entre coeficientes de condutividade hidráulica para diferentes temperaturas que leva em conta não somente a variação do peso específico e da viscosidade do fluido permeante, como também a variação no índice de vazios com a temperatura. A relação é a seguinte:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\gamma_1 \cdot \mu_2}{\gamma_2 \cdot \mu_1} \cdot \frac{\left[ 1 - \left( \frac{3 \cdot \alpha_T \cdot \Delta T}{e_2} \right) \right]}{(1 + 2\alpha_T \cdot \Delta T)}, \text{ sendo } T_2 > T_1 \quad (90)$$

onde:  $\Delta T = T_2 - T_1$

$\alpha_T = \frac{\varepsilon_{VT}}{\Delta T}$  e  $\varepsilon_{VT} = \frac{\Delta V_T}{V_m}$  (deformação volumétrica devido a variação de

temperatura), sendo  $\Delta V_T$  a variação de volume devido a temperatura, e  $V_m$  o volume total à temperatura inicial.

Durante a campanha de ensaios aqui realizados, mediu-se o volume inicial e final de cada corpo de prova, quando submetido a diferentes gradientes de temperatura. Para as temperaturas mais baixas, 30°C, não ocorreu variação de volume.

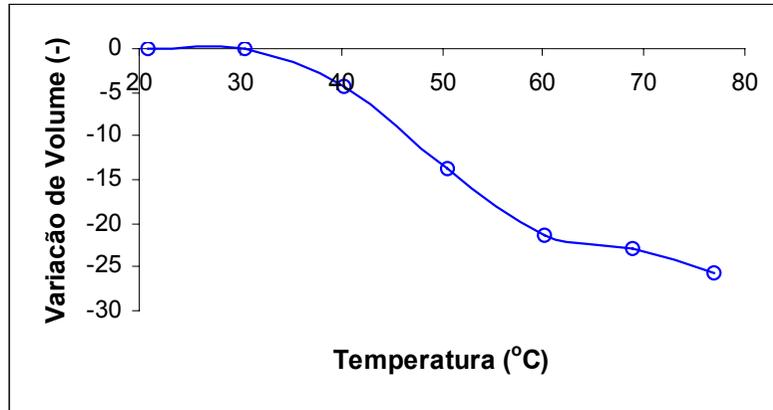
Da mesma maneira que, para os corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas na mufla, a altura não variou com a temperatura. Os diâmetros sofreram variações até a redução máxima de 9,90cm, observado nas temperaturas de 70°C e 80°C.

As Tabelas 34 e 35 apresentam os dados finais dos corpos de prova e os parâmetros necessários para a solução da equação 90, respectivamente para o solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos. É importante ressaltar que ao valor encontrado de redução de diâmetro máximo, para 9,90cm e 10,10, respectivamente para o solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos, foram os mesmos valores encontrados quando foram submetidos a secagem para o ensaio na temperatura ambiente, item 7.1.

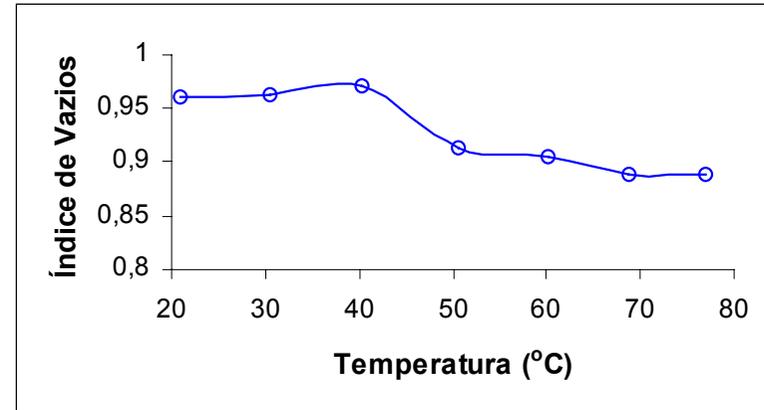
As Figuras 59 e 60 apresentam o comportamento dos parâmetros das Tabelas 34 e 35. Observa-se que a variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos é muito menor do que a variação de volume para o solo do Campo Experimental. Como os corpos de prova da Cidade dos Meninos foram confeccionados com um índice de vazios muito pequeno, estes se deformam menos com a temperatura, sem contar que o solo do Campo Experimental é mais argiloso que o solo da Cidade dos Meninos, esperando-se assim que um maior efeito da temperatura deve ser observado no solo mais argiloso.

Este comportamento de redução do índice de vazios com a temperatura já havia sido observada por vários autores, incluindo Campanela e Michell (1968), Towhata et al. (1993), Marques (1996), Rabe et al. (2003). Passwell (1967) afirmou que quanto maiores fossem as temperaturas impostas maiores seriam as deformações sofridas pelos materiais. Os resultados aqui apresentados estão de acordo com o descrito.

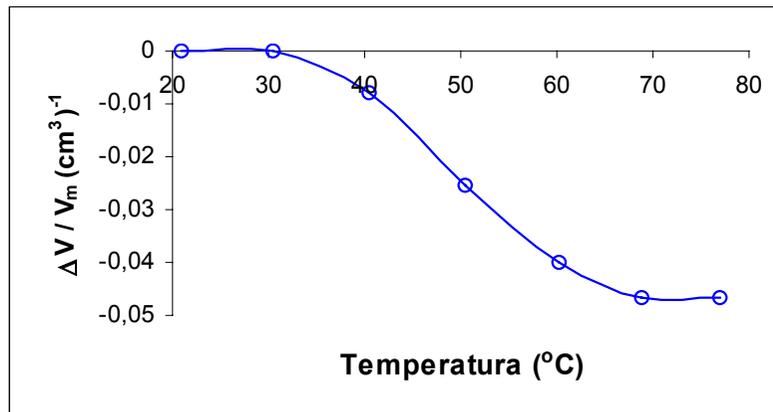
A variação da deformação volumétrica devido a temperatura,  $\varepsilon_{VT} = \frac{\Delta V_T}{V_m}$ , foi diminuindo até se manter constante, fazendo com que o valor de  $\alpha_T = \frac{\varepsilon_{VT}}{\Delta T}$ , variasse com a temperatura, não se mantendo constante e havendo uma diminuição nas temperaturas finais, pois a deformação volumétrica tendia a uma constante e a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) continuava crescente. Isto foi observado para ambos os solos.



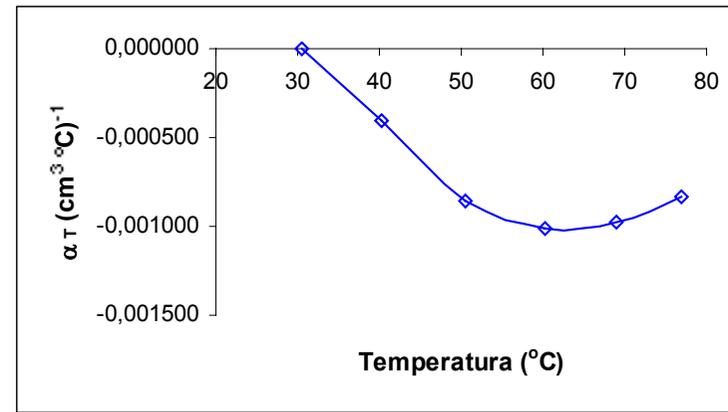
(a)



(b)

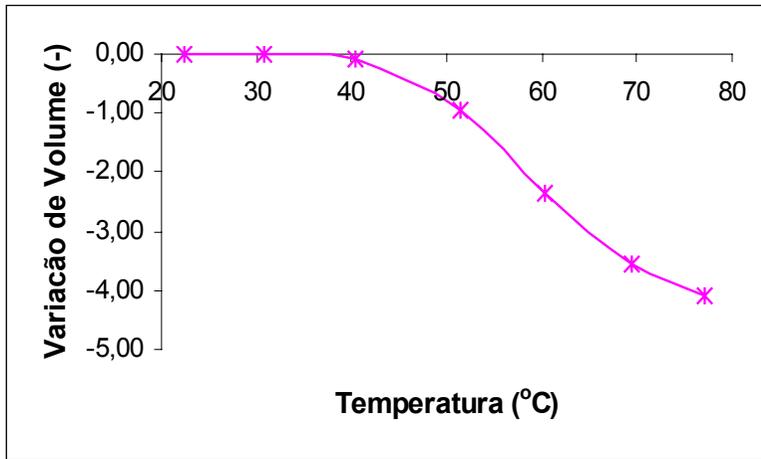


(c)

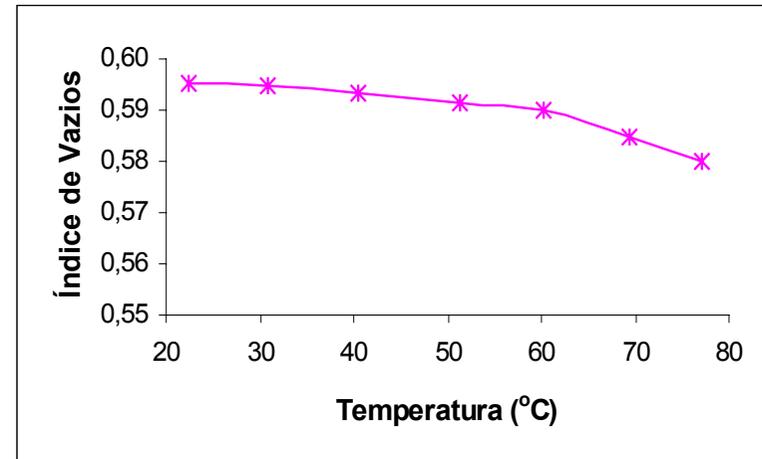


(d)

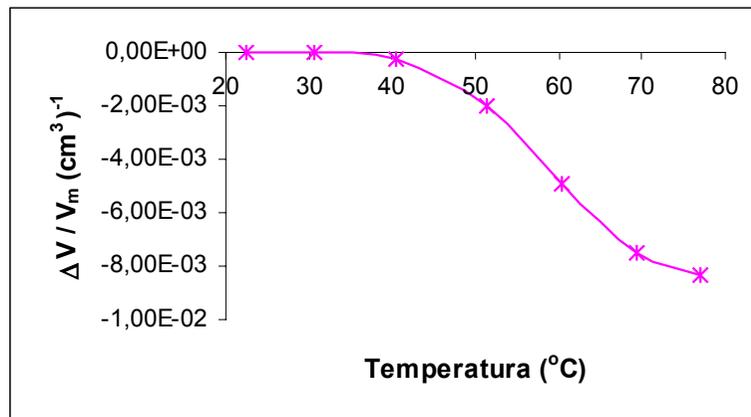
Figura 59 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo do Campo Experimental: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c)  $\Delta V / V_m$  x temperatura, (d)  $\alpha_T$  x temperatura.



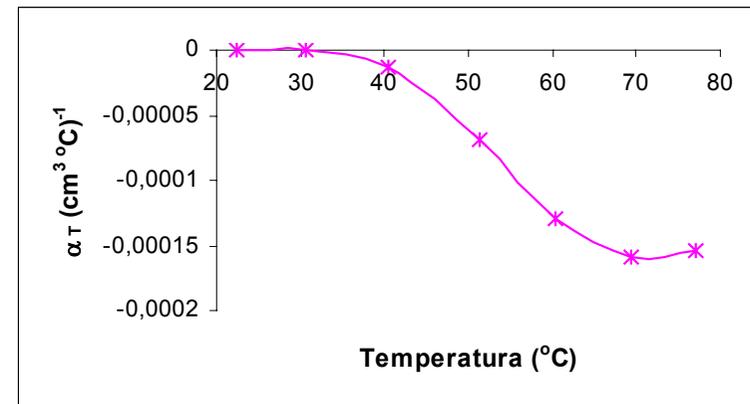
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 60 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo da Cidade dos Meninos: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c)  $\Delta V / V_m$  x temperatura, (d)  $\alpha_T$  x temperatura.

Tabela 34 – Dados finais do ensaio do solo do Campo Experimental

Temp. (°C)	$\Delta T$ (°C)	diâmetro final (cm)	volume inicial (cm <sup>3</sup> )	volume final (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\varepsilon \times 10^{-3}$	$\alpha_t \times 10^{-4}$	$e_{final}$
30,49	10,49	10,14	551,27	551,27	0,00	0,00	0,00	0,96
40,35	20,35	10,10	541,05	536,79	-4,26	-7,87	-4,05	0,97
50,57	30,57	10,01	539,17	525,43	-13,74	-25,48	-8,58	0,91
60,19	40,19	9,93	536,47	515,09	-21,39	-39,87	-10,14	0,90
68,89	48,89	9,90	487,51	464,70	-22,80	-46,78	-9,75	0,89
77,00	57,00	9,90	548,58	522,92	-25,66	-46,78	-8,34	0,89

Tabela 35 – Dados finais do ensaio do solo da Cidade dos Meninos

Temp. (°C)	$\Delta T$ (°C)	diâmetro final (cm)	volume inicial (cm <sup>3</sup> )	volume final (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\varepsilon \times 10^{-4}$	$\alpha_t \times 10^{-5}$	$e_{final}$
30,74	8,28	10,14	478,23	478,23	0,00	0,00	0,00	0,59
40,39	17,93	10,14	462,29	462,18	-0,10	-2,21	-1,23	0,59
51,42	28,96	10,13	483,67	482,72	-0,95	-19,71	-6,81	0,59
60,30	37,84	10,12	477,42	475,07	-2,35	-49,25	-13,02	0,59
69,49	47,03	10,10	477,22	473,65	-3,57	-74,81	-15,91	0,58
77,52	54,54	10,10	488,32	484,23	-4,08	-83,65	-15,34	0,58

Aplicando-se os valores dos parâmetros das Tabelas 34 e 35 na equação 90 proposta por de Campos (1979), para estimar as condutividades hidráulicas nas temperaturas dos ensaios, obteve-se valores de condutividades hidráulicas que não são satisfatórios. Este valores foram mais baixos do que os valores de condutividades hidráulicas aqui encontrados. Os valores obtidos para ambos os solos estão listados na Tabela 36. Com o aumento da temperatura os valores das condutividades hidráulicas estimadas ficam ainda mais distantes dos valores das condutividades hidráulicas obtidos em laboratório.

Este resultado vem demonstrar que ocorrem variações estruturais nos corpos de prova quando submetidas a incrementos de temperatura que estão além do que previsto por de Campos (1979). As variações podem ser causadas pelo microfissuramento e pela compressão do esqueleto sólido, como foi discutido no item 7.1. Assim como pelo aumento dos poros, conforme relatado no item 7.3. Mesmo levando-se em conta a contribuição da variação de volume refletida na variação do índice de vazios, ainda não foi possível prever o aumento na condutividade hidráulica devido aos incrementos de temperatura. Ainda existe um parâmetro na equação de Taylor que é influenciado pela temperatura. Como  $D_s$  é constante, a variação só pode estar no fator de forma  $C$ , o qual correlaciona os vazios do solo através de canálculos, sendo provavelmente influenciado pelas

microfissuras induzidas e aumento percentual de poros no solo, quando este é aquecido. A equação proposta por de Campos levando em conta o fator de forma é apresentada a seguir:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\gamma_1 \cdot \mu_2}{\gamma_2 \cdot \mu_1} \cdot \frac{\left[ 1 - \left( \frac{3 \cdot \alpha_T \cdot \Delta T}{e_2} \right) \right]}{(1 + 2\alpha_T \cdot \Delta T)} \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad (91)$$

Utilizando-se das relações do fator de forma normalizado com a temperatura obtida através dos ensaio de condutividade hidráulica na temperatura ambiente para corpos de prova pré aquecidas, apresentada no item 7.1 (Figura 38), pode-se estimar a condutividade hidráulica levando-se em conta o microfissuramento da matriz de solo devido a incrementos de temperatura. Estes valores de condutividade hidráulica também estão listados na Tabela 36. A Figura 61 representa os valores das condutividades hidráulicas listadas na Tabela 36.

Tabela 36 – Comparação das condutividades hidráulicas obtidas

Campo Experimental				Cidade dos Meninos			
Temp (°C)	K(m/s)x10 <sup>-7</sup> medido	k(m/s)x10 <sup>-7</sup> de Campos	k(m/s)x10 <sup>-7</sup> fator C linear/expon.	Temp. (°C)	k(m/s)x10 <sup>-7</sup> medido	k(m/s)x10 <sup>-7</sup> De Campos	k(m/s)x10 <sup>-7</sup> fator C linear
30,49	1,90	1,34	1,77 / 2,44	30,74	3,55	3,43	4,68
40,35	4,11	1,72	3,09 / 3,41	40,39	6,53	4,24	6,82
50,57	5,92	2,17	4,69 / 4,67	51,42	9,51	4,83	9,15
60,19	8,25	2,84	7,41 / 6,72	60,30	12,17	5,84	12,39
68,89	13,74	3,92	11,51 / 9,80	69,49	15,51	6,80	16,01
77,00	25,00	4,60	15,10 / 12,30	77,52	18,89	7,62	19,44

Observa-se que há uma sensível melhora entre os valores estimados e os valores medidos quando se leva em conta o fator de forma C, evidenciando que a temperatura realmente afeta a estrutura do solo. Para o solo da Cidade dos Meninos a previsão está coincidente com os valores ensaiados. No caso do solo do Campo Experimental, mesmo levando-se em conta a variação do fator de forma C com a temperatura, os valores previstos e ensaiados ainda apresentam um erro de aproximadamente 10% ao longo do ensaio chegando a 40% para a temperatura de 80°C. Para se fazer a previsão do aumento da condutividade hidráulica do solo do Campo Experimental com a temperatura levando-se em consideração o fator de forma foram utilizadas duas relações, uma linear e outra exponencial, apresentadas na Figura 38. A relação linear melhor ajustou aos dados, o que já era

de se esperar, pois a relação linear tem uma melhor valor de ajuste aos dados do que a exponencial. Como até 70°C a previsão utilizando-se do fator de forma esta muito próxima acredita-se ter ocorrido algum erro no ensaio a temperatura de 80°C.

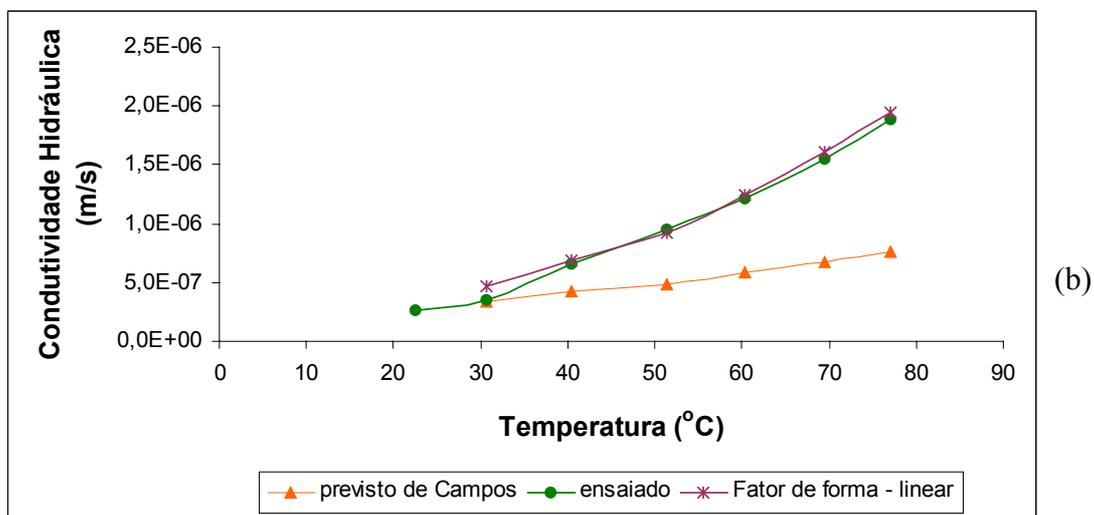
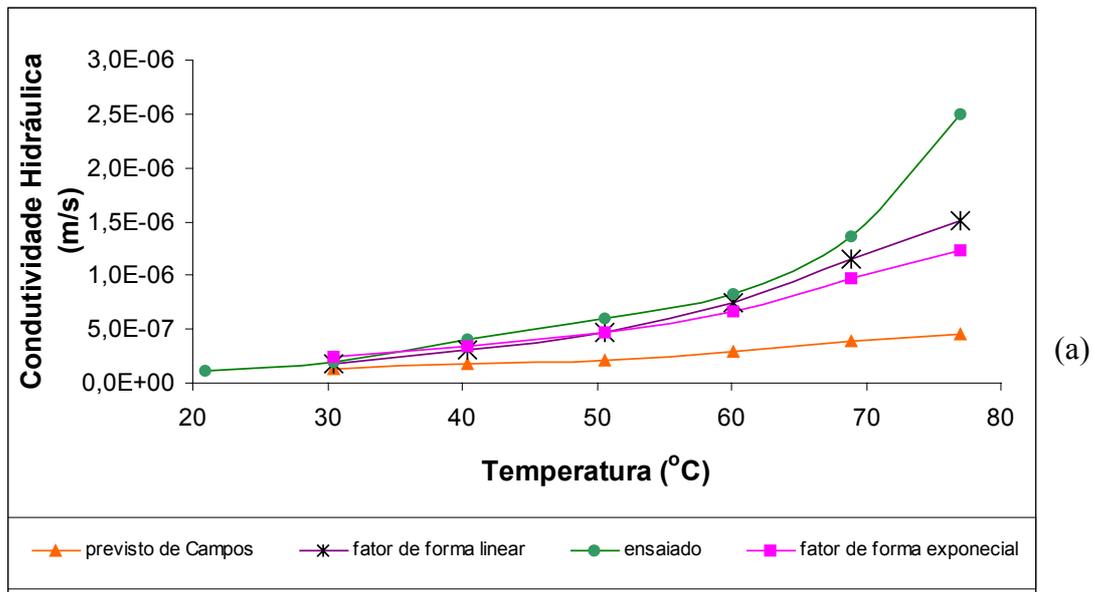


Figura 61 – Variação da condutividades hidráulicas com a temperatura.

Provavelmente, se os valores dos coeficientes de variação de volume solo-temperatura (Tabelas 34 e 35) fossem medidos diretamente através de ensaios de dissipação com aquecimento controlado os resultados da estimativa da condutividade hidráulica poderiam ser melhores.

## 7.5

### Célula de Compressão Isotrópica com Temperatura Controlada

Com o intuito de se verificar a variação de volume com a temperatura, fez-se algumas modificações no permeâmetro de temperatura controlada, conforme descrito em 6.5. Os procedimentos utilizados para esta determinação estão descritos no item 6.5.1, e a maneira como este solo foi compactado está descrito no item 5.2.1

O ensaio de deformação volumétrica foi feito num único corpo de prova, para cada solo. Após a sua saturação incrementos de temperatura eram aplicados, com as drenagens fechadas, e depois das poropressões estabilizadas as drenagens eram abertas e media-se o volume que saia da amostra. Os dados iniciais e finais dos corpos de prova utilizados nos ensaios estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Dados dos corpos de prova ensaiados.

Solo	estágio	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w(%)	e
Campo Experimental	Inicial	16,83	13,75	22,40	0,96
	final	19,40	14,88	30,27	0,81
Cidade dos Meninos	Inicial	18,66	15,88	17,58	0,64
	final	20,79	16,67	24,73	0,61

Os incrementos de temperatura aplicados foram sempre de 10°C, submetendo os corpos de prova a temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C. A Figura 62 apresenta as curvas de estabilização de poropressão e de variação de volume com o tempo, tomando como exemplo o ensaio do solo do Campo Experimental a temperatura de 30°C. Da curva de variação de volume para cada temperatura retira-se a variação de volume daquele estágio. Essas variações de volume são somadas para a obtenção da variação de volume total. Pode-se notar na Figura 62(a), que as poropressões se estabilizam mantendo-se constantes nestes valores. Na Figura 62(b) observa-se que a maior variação de volume ocorre nos primeiros minutos da abertura da drenagem, tendendo a um valor constante. As curvas traçadas para os demais incrementos de temperatura se encontram no Apêndice E.

A Tabela 38 apresenta os parâmetros de deformação volumétrica obtidas nestes ensaios. Observa-se que a variação de volume do solo da Cidade dos

Meninos é muito pequena, e, que esta variação muito pequena fez com que as medidas de volume ficassem oscilantes ao longo do tempo.

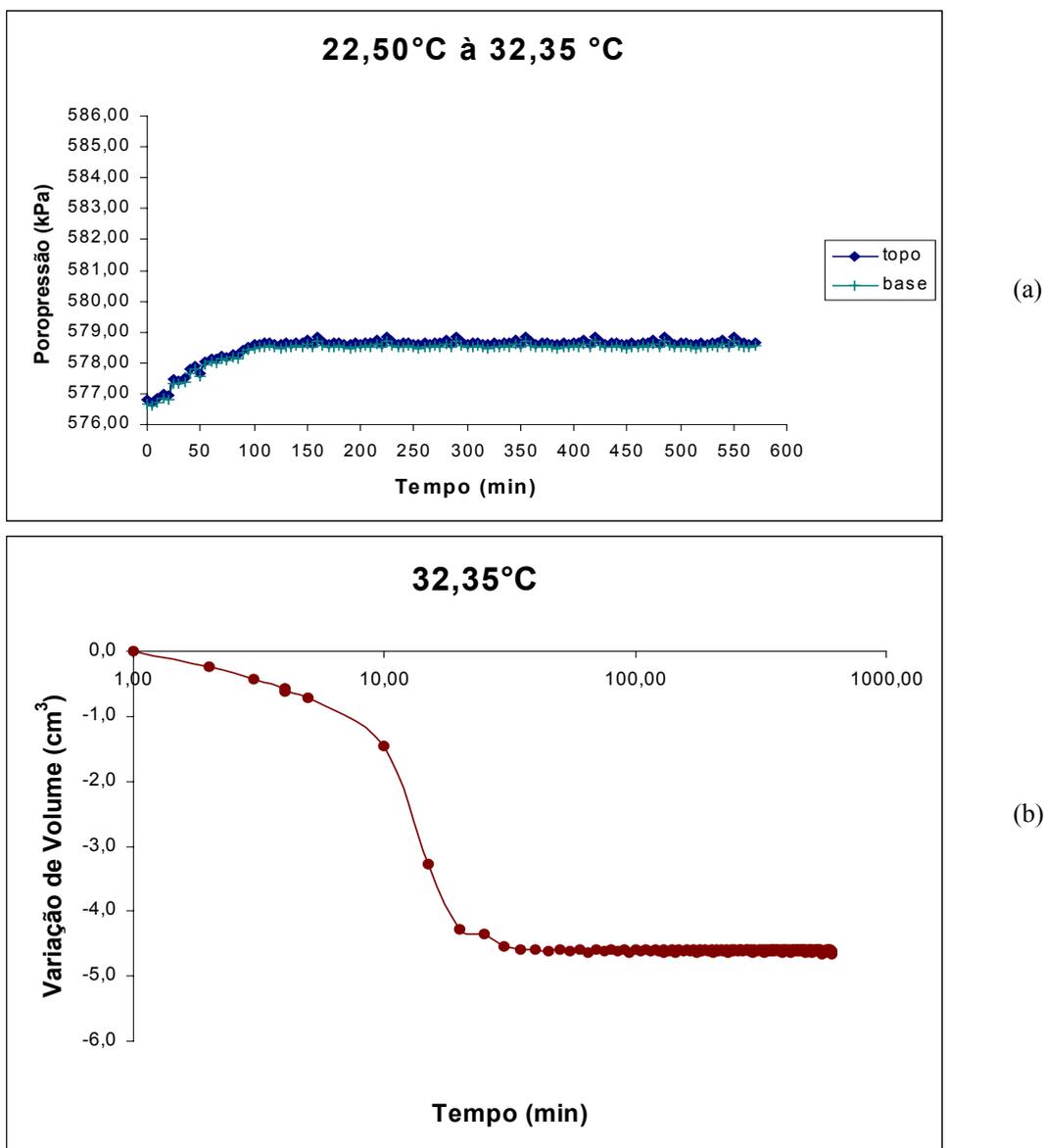


Figura 62 – Ensaio para o solo do Campo Experimental na temperatura de 32°C: (a) variação da poropressão com o tempo; (b) variação de volume com o tempo.

Tabela 38 – Resultados do ensaio de dissipação.

Campo Experimental					Cidade dos Meninos				
Temp. (°C)	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\alpha_t \times 10^{-4}$	$e_{final}$	Temp. (°C)	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\epsilon \times 10^{-4}$	$\alpha_t \times 10^{-5}$	$e_{final}$
22,67	0,00	0,00	0	0,96	22,46	0,00	0,00	0	0,601
32,35	-4,61	-9,52	-9,84	0,94	32,30	-0,45	-9,29	-9,44	0,600
40,46	-9,78	-10,78	-13,29	0,92	40,58	-0,90	-18,58	-10,26	0,599
49,99	-15,45	-11,95	-14,00	0,90	51,33	-1,28	-26,43	-9,16	0,597
60,03	-26,82	-24,25	-22,16	0,85	60,67	-1,71	-35,31	-9,24	0,596
69,75	-30,63	-8,33	-8,48	0,84	69,93	-2,09	-43,16	-9,09	0,595
78,22	-31,54	-2,01	-2,36	0,84	78,90	-2,50	-51,62	-9,14	0,593

A Figura 63 ilustra as variações de volume oscilante com o tempo, mostrando que os ensaios foram feitos no limite da resposta do equipamento, estando com valores inferiores a precisão do equipamento. Essas oscilações observadas na Figura 63 (b) mostram que as variações estavam abaixo da precisão do medidor de variação de volume que é de 4,5cm<sup>3</sup> (histerese de 3%, conforme Apêndice A), será considerado o valor limitante de deformação pois sabe-se que este material não poderia absorver água e depois se contrair novamente. As demais curvas também se encontram no Apêndice E.

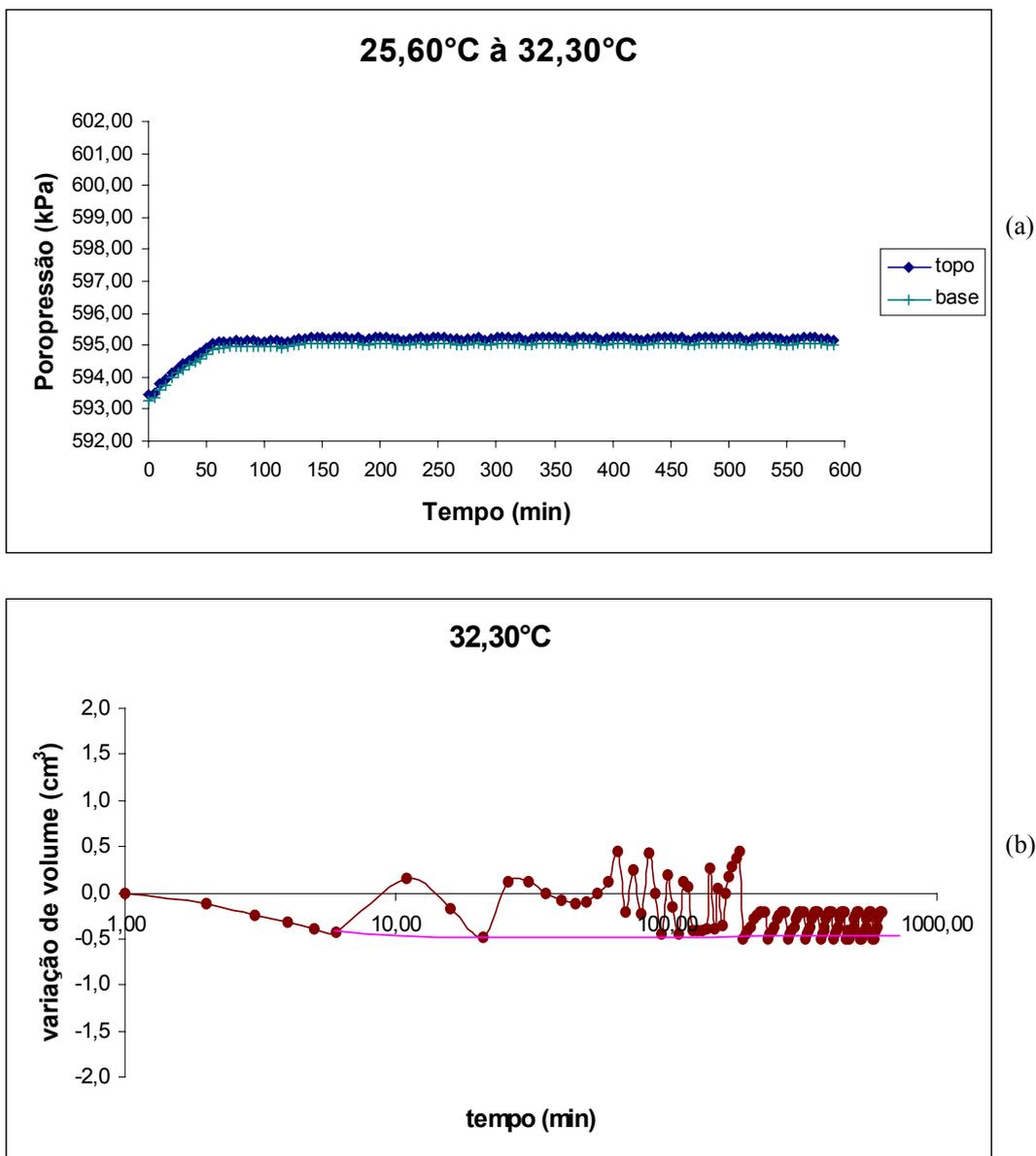


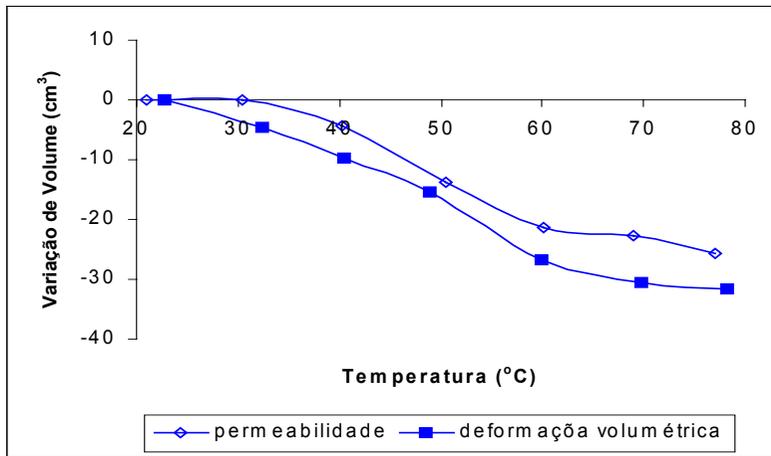
Figura 63 – Ensaio de variação de volume para o solo da Cidade dos Meninos na temperatura de 32,30°C: (a) variação da poropressão com o tempo; (b) variação de volume com o tempo.

A variação do índice de vazios para este ensaio foi maior do que a variação obtida para os ensaios de condutividades hidráulica. Os valores de  $\alpha_t$ , não se mantiveram constantes, e seu comportamento foi semelhante aos obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica. A pequena diferença observada nos gráficos das Figuras 64 e 65 é devido a esta maior variação de volume e consequentemente do índice de vazios com a temperatura.

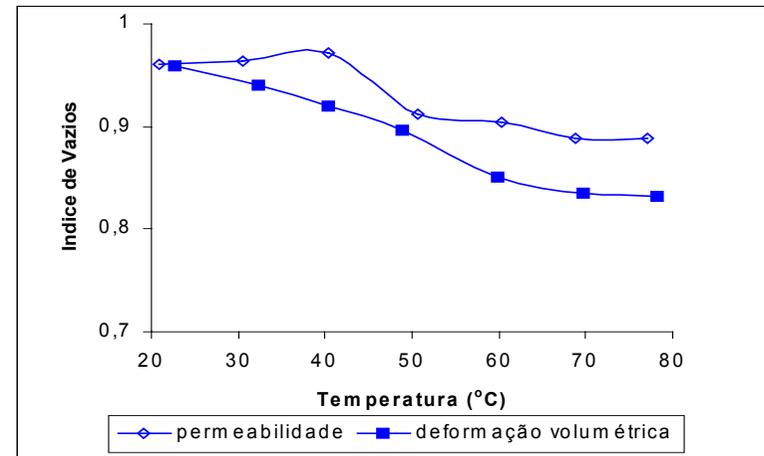
Para o solo da Cidade dos Meninos a variação de volume devido a incrementos de temperatura foi praticamente constante para todos os estágios, crescente com a mesma inclinação até o valor máximo. Os valores de  $\alpha_t$  tenderam para um valor constante. O índice de vazios variou somente na terceira casa decimal, conforme Tabela 38.

A variação total de volume medida neste ensaio foi de 31,54 cm<sup>3</sup> para o solo do Campo Experimental e de 2,50 cm<sup>3</sup> para o solo da Cidade dos Meninos. No ensaio de condutividade hidráulica com temperatura controlada, onde a variação de volume era estimada através de medições de comprimento e largura dos corpos de prova, no início e no final do ensaio com o auxílio de um paquímetro, as variações de volume entre os extremos de temperatura foram: 25,66 cm<sup>3</sup> (Campo Experimental) e 4,08 cm<sup>3</sup> (Cidade dos Meninos). As medidas feitas com o paquímetro costumam ser mais imprecisas do que as medidas eletrônicas do medidor de variação de volume. No caso do solo da Cidade dos Meninos a variação de volume para cada estágio de temperatura foi inferior a precisão do aparelho, sendo para este caso provavelmente a medida mais precisa a obtida com o auxílio do paquímetro.

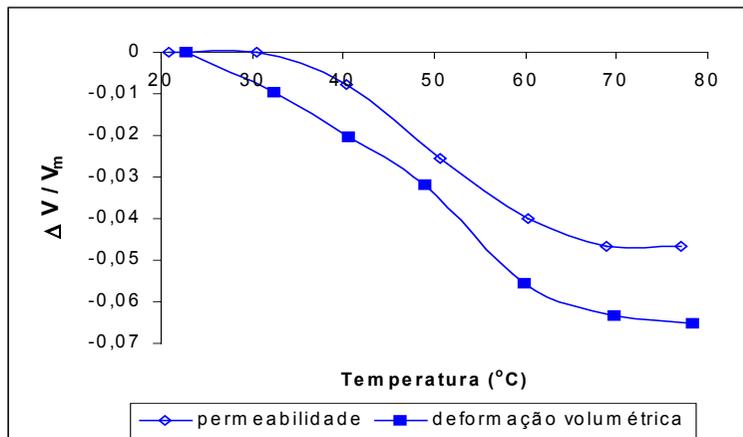
As Figura 64 e 65 mostram as variações dos parâmetros de deformação volumétrica da Tabela 38 com a temperatura. Para ambos os solos o comportamento de variação de volume, índice de vazios,  $\varepsilon$  e  $\alpha_t$  seguiram o mesmo padrão. Conforme já observado, quase não houve variação de volume no ensaio para o solo da Cidade dos Meninos. A discrepância entre os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica observados na Figura 65 são devidas a pequena variação de volume aqui encontrada. Já o solo do Campo Experimental, apresentou uma maior variação de volume nos ensaios de dissipação do que nos ensaios de condutividade hidráulica.



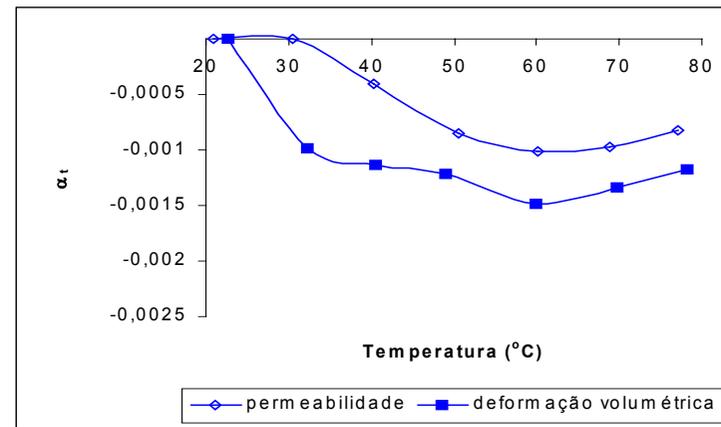
(a)



(b)

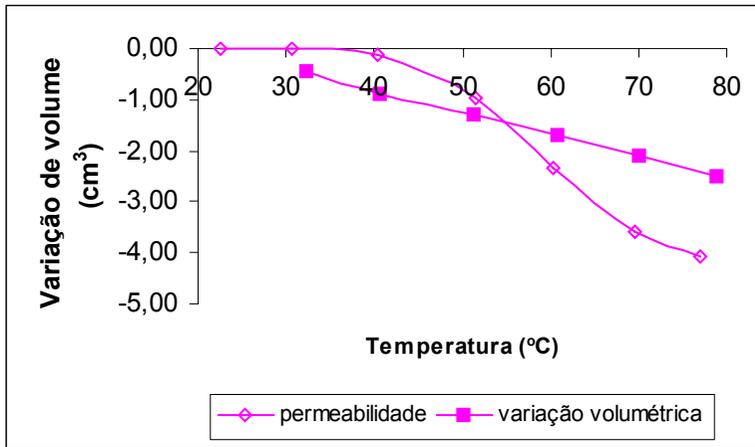


(c)

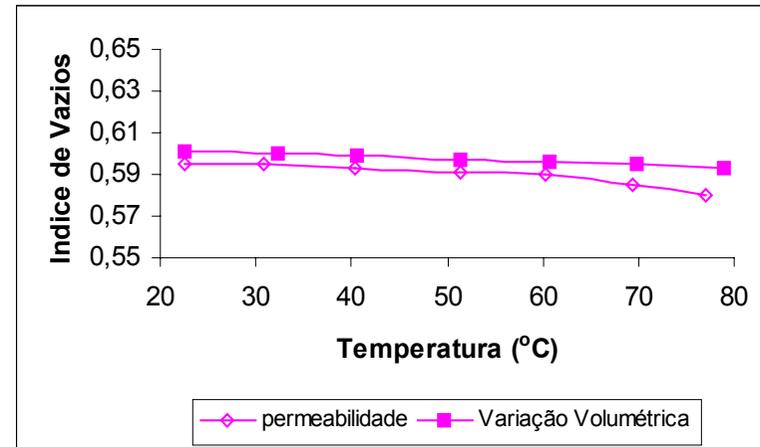


(d)

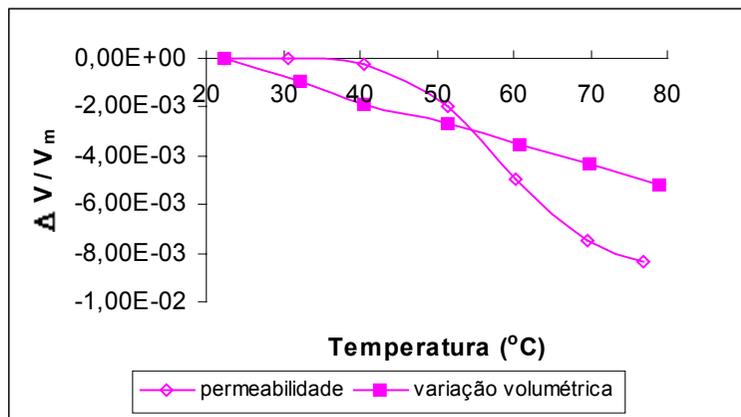
Figura 64 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo do Campo Experimental: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c)  $\Delta V / V_m$  x temperatura, (d)  $\alpha_t$  x temperatura.



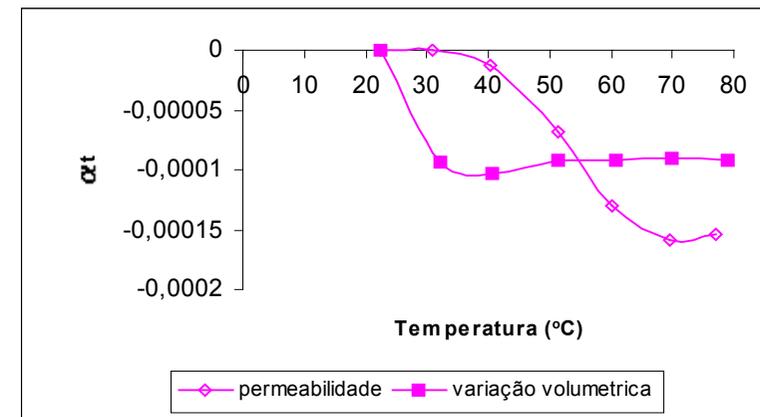
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 65 – Variação dos Parâmetros com a temperatura para o solo da Cidade dos Meninos: (a) variação de volume x temperatura, (b) variação do índice de vazios x temperatura, (c)  $\Delta V / V_m$  x temperatura, (d)  $\alpha t$  x temperatura.

Aplicou-se os valores dos parâmetros das Tabela 38 na equação 90 proposta por De Campos (1979) e na equação (91), que leva em conta o fator de forma, para estimar as condutividades hidráulicas nas temperaturas dos ensaios, e os valores obtidos estão apresentados na Figura 66.

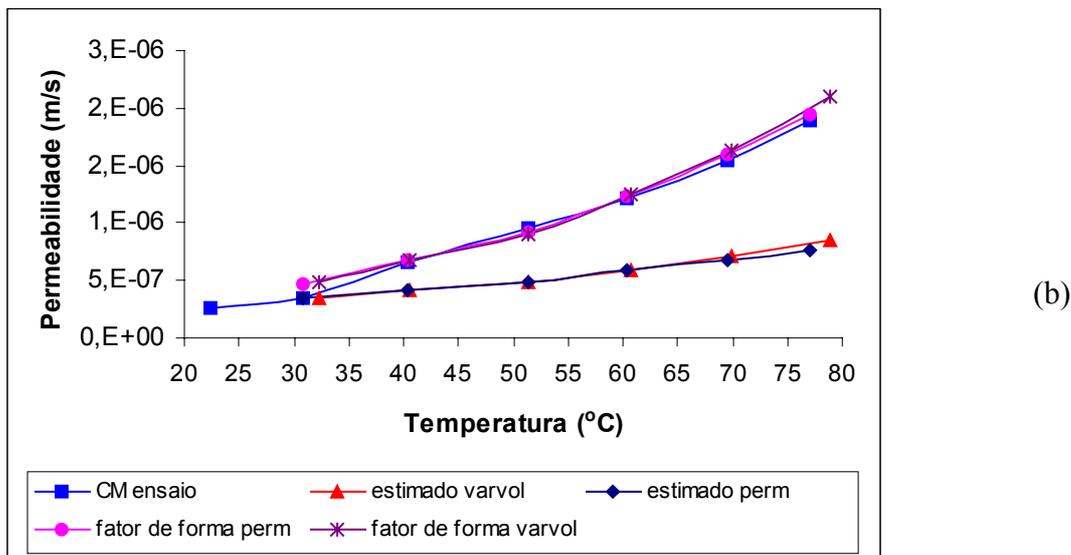
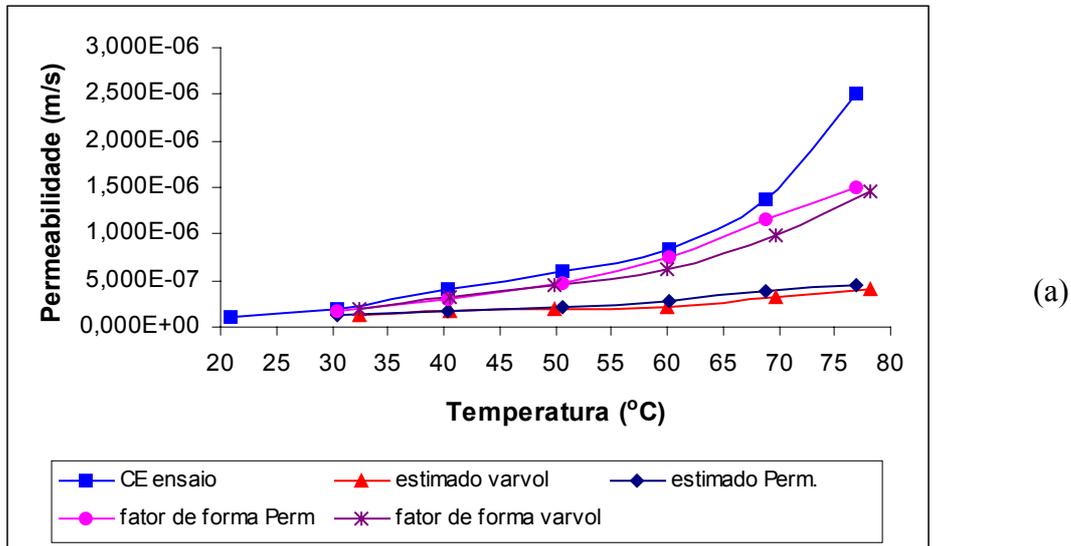


Figura 66 – Comparação da variação da condutividade hidráulica medida e estimada com a temperatura: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.

Pode-se observar que a estimativa das condutividades hidráulicas não apresentou uma diferença sensível quanto a maneira com que os parâmetros foram determinados. A discrepância entre a condutividade hidráulica medida e estimada sem levar em conta o fator de forma continuou da ordem de 80% para o solo da Campo Experimental e de 40% para o solo da Cidade dos Meninos. Observou-se

novamente uma boa aproximação entre os valores estimados e os valores medidos quando utilizou-se do fator de forma C, ficando o solo da Cidade dos Meninos totalmente coincidente com os valores ensaiados e o solo do Campo Experimental continuou com uma variação de aproximadamente 10% com exceção da condutividade hidráulica à 80°C. Estes resultados vem mais um a vez enfatizar a influência da temperatura na estrutura do solo, e que uma previsão de comportamento tem que levar este fator em conta.