

5 Apresentação e Análise dos Resultados

5.1. Condutividade Térmica

Para a realização dos ensaios de condutividade térmica foi utilizado o procedimento discutido no item 4.2.1. Os valores de condutividade térmica são fornecidos diretamente através de um sistema de aquisição de dados acoplado à sonda térmica. Os corpos de prova ensaiados foram confeccionados de acordo com o que foi descrito nos itens 4.1.2 e 4.1.3.

Os resultados obtidos para os diferentes solos serão apresentados separadamente, sendo feita uma comparação entre eles no item 5.3.

5.1.1. Areia Mal Graduada e Areia Uniforme

A Areia Mal graduada (AMG) e a Areia Uniforme (AU) foram ensaiadas com diferentes graus de saturação e diferentes índices de vazios de acordo com a metodologia apresentada no item 4.2.1.1. Trabalhou-se com as areias secas, saturadas e não saturadas. Variou-se o índice de vazios através da variação do tempo de compactação por vibração, alcançando-se para as duas areias os índices de vazios máximo e mínimo.

A Tabela 15 e a Tabela 16 apresentam os dados dos corpos de prova ensaiados e os respectivos resultados de condutividade térmica obtidos para as areias Mal Graduada (AMG) e Uniforme (AU) secas, respectivamente.

A Figura 31 apresenta os gráficos que relacionam a condutividade térmica das duas areias com a variação do índice de vazios para umidade gravimétrica e grau de saturação iguais a zero.

Tabela 15 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AMG seca.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
AMG (S=0%)	01	0,00	0,00	0,37	1,93	0,250
	02	0,00	0,00	0,37	1,92	0,260
	03	0,00	0,00	0,39	1,90	0,283
	04	0,00	0,00	0,40	1,89	0,260
	05	0,00	0,00	0,41	1,88	0,250
	06	0,00	0,00	0,45	1,82	0,273
	07	0,00	0,00	0,52	1,74	0,240
	08	0,00	0,00	0,54	1,72	0,220
	09	0,00	0,00	0,65	1,60	0,180
	10	0,00	0,00	0,66	1,59	0,200

Tabela 16 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AU seca.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
AU (S=0%)	01	0,00	0,00	0,77	1,50	0,180
	02	0,00	0,00	0,79	1,48	0,183
	03	0,00	0,00	0,92	1,38	0,177
	04	0,00	0,00	0,98	1,34	0,177
	05	0,00	0,00	1,08	1,27	0,170
	06	0,00	0,00	1,13	1,24	0,140
	07	0,00	0,00	1,18	1,22	0,150

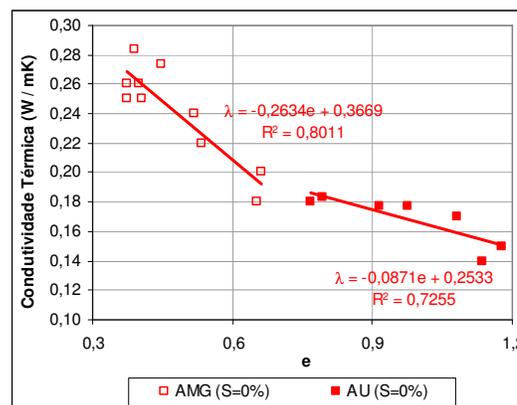


Figura 31 - Curvas de condutividade térmica x índice de vazios – AMG e AU secas.

Observa-se a partir dos gráficos apresentados na Figura 31 que os valores de condutividade térmica para as duas areias secas tenderam a diminuir com a elevação do índice de vazios, o que já era esperado, pois a redução dos contatos entre a partículas do solo reduz a sua capacidade de conduzir calor. Entretanto, observa-se que a influência da variação do índice de vazios nos valores de condutividade térmica é pouco significativa para as areias secas, ou

seja, a diferença entre os valores correspondentes aos índices de vazios máximo e mínimo é pequena.

Na Figura 31 pode-se observar ainda que se obteve menores índices de vazios através da compactação para a Areia Mal Graduada (AMG) do que para a Areia Uniforme (AU), sendo este o resultado esperado, visto que sendo mal graduada, a areia possui grãos de tamanhos diferentes que após vibração atingem maior compactação, ao contrário da Areia Uniforme, que possui grãos com o mesmo diâmetro, não permitindo que os seus vazios sejam preenchidos por grãos menores.

Os resultados de condutividade térmica para a Areia Mal Graduada seca variaram de 0,180 a 0,283 W/mK para índices de vazios de 0,65 a 0,39 e para Areia Uniforme variaram de 0,140 a 0,183 W/mK para índices de vazios de 1,13 a 0,79. As diferenças entre as capacidades de conduzir calor das duas areias não foram significativas, sendo que a areia mal graduada apresentou valores ligeiramente maiores, provavelmente devido aos menores índices de vazios alcançados.

As areias Mal Graduada (AMG) e Uniforme (AU) não saturadas foram ensaiadas da mesma forma descrita para o estado seco. É importante lembrar que cada areia foi preparada e ensaiada para duas umidades gravimétricas diferentes, variando-se o índice de vazios para uma mesma umidade gravimétrica. Com isso, variou-se também o grau de saturação, levando-se em consideração a formulação utilizada para a sua determinação:

$$S = G \cdot w / e \quad (41)$$

onde:

S – grau de saturação

G – densidade dos grãos (g/cm^3)

w – umidade gravimétrica

e - índice de vazios

A Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam os dados dos corpos de prova ensaiados com os respectivos resultados de condutividade térmica obtidos. As tabelas citadas mostram que a Areia Mal Graduada (AMG) foi ensaiada com umidades médias de 7,41% e 11,43%, e a Areia Uniforme (AU) com umidades médias mais elevadas, de 16,96% e 22,66%.

Tabela 17 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AMG não saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
AMG (19%<S<40%)	01	8,06	39,26	0,54	1,71	1,09
	02	7,62	35,18	0,57	1,68	1,26
	03	7,37	34,18	0,57	1,68	1,23
	04	7,33	31,51	0,61	1,64	0,87
	05	7,47	30,56	0,65	1,61	1,12
	06	7,33	27,03	0,72	1,54	0,97
	07	7,16	24,21	0,78	1,48	1,03
	08	6,91	19,13	0,96	1,35	0,69
AMG (40%<S<80%)	01	11,58	79,16	0,39	1,91	1,94
	02	11,47	57,60	0,53	1,73	1,40
	03	11,35	46,51	0,65	1,61	1,30
	04	11,30	40,48	0,74	1,52	0,93

Tabela 18 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AU não saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
AU (27%<S<45%)	01	17,55	44,34	1,05	1,29	1,10
	02	17,45	43,00	1,07	1,28	1,28
	03	17,55	40,81	1,14	1,24	0,95
	04	16,47	33,55	1,30	1,15	0,94
	05	15,79	27,73	1,51	1,06	0,82
AU (40%<S<80%)	01	23,44	77,65	0,80	1,47	1,98
	02	23,13	64,71	0,95	1,36	1,57
	03	22,88	58,46	1,04	1,30	1,42
	04	22,06	54,64	1,07	1,28	1,20
	05	21,77	43,89	1,31	1,14	1,03

A Figura 32 apresenta as relações entre a condutividade térmica e a variação do índice de vazios e entre o grau de saturação e a variação do índice de vazios para as duas areias não saturadas, para as umidades médias de 7,41% (AMG) e 16,49% (AU).

Observa-se a partir da Figura 32(a) que mais uma vez a condutividade térmica das duas areias tendeu a diminuir com a elevação do índice de vazios, como foi observado também no estado seco.

Observa-se ainda que o grau de saturação diminui com o aumento do índice de vazios, como pode ser visto na Figura 32(b), o que contribui ainda mais para a redução da condutividade térmica das areias, pois o ar possui menor condutividade térmica do que a água. Portanto, quanto maior o grau de saturação, maior a capacidade do solo de conduzir calor (Figura 33).

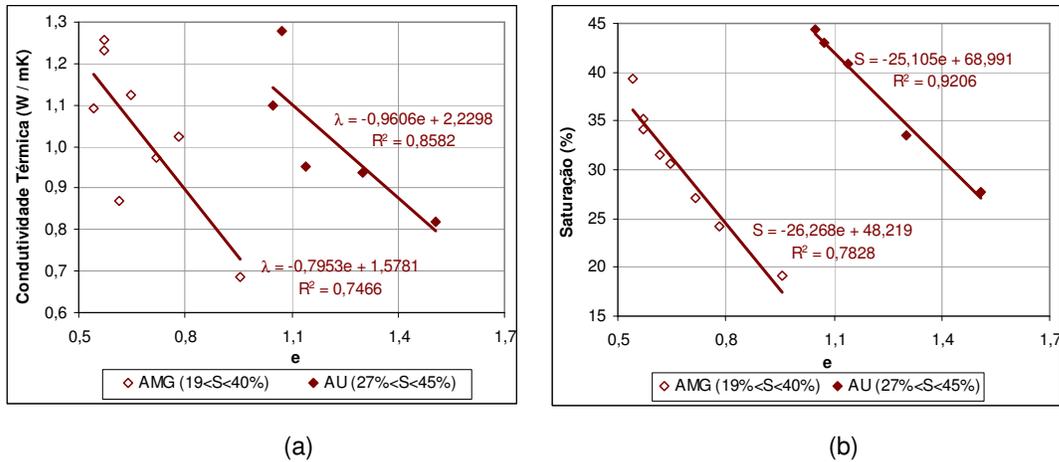


Figura 32 – Curvas de condutividade térmica x índice de vazios (a), índice de vazios x grau de saturação (b) – AMG (19%<S<40%) e AU (27%<S<45%) não saturadas.

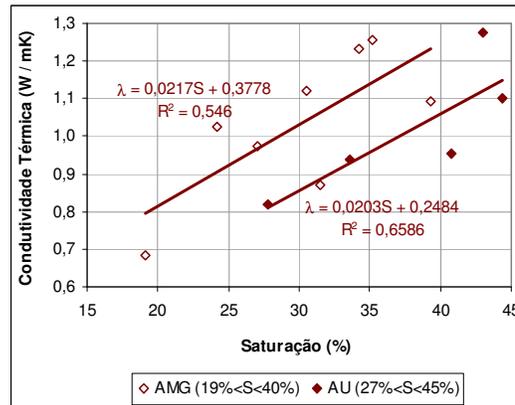


Figura 33 – Curva de condutividade térmica x grau de saturação - AMG (19%<S<40%) e AU (27%<S<45%) não saturadas.

A Figura 33 mostra que para um mesmo grau de saturação, a Areia Mal Graduada (AMG) apresenta condutividades maiores que a Areia Uniforme (AU), mesmo possuindo umidades menores. Tal fato pode ser explicado pela Figura 32(b), que mostra que para um mesmo grau de saturação, a AMG apresenta menores índices de vazios que a AU.

Os resultados de condutividade térmica para a Areia Mal Graduada com umidade gravimétrica média de 7,41% variaram de 0,69 a 1,26 W/mK para índices de vazios de 0,96 a 0,57 e para Areia Uniforme com umidade média de 16,96% variaram de 0,82 a 1,28 W/mK para índices de vazios de 1,51 a 1,07.

Observa-se que os valores de condutividade térmica encontrados foram maiores que os apresentados para as duas areias secas, pois a água possui condutividade térmica 25 vezes maior que o ar.

Aumentando-se as umidades médias das duas areias para 11,43% (AMG) e 22,66% (AU), obtiveram-se novas relações entre a condutividade térmica e a variação do índice de vazios e entre o grau de saturação e a variação do índice de vazios para as duas areias não saturadas, com graus de saturação variando entre 40% e 80% (Figura 34).

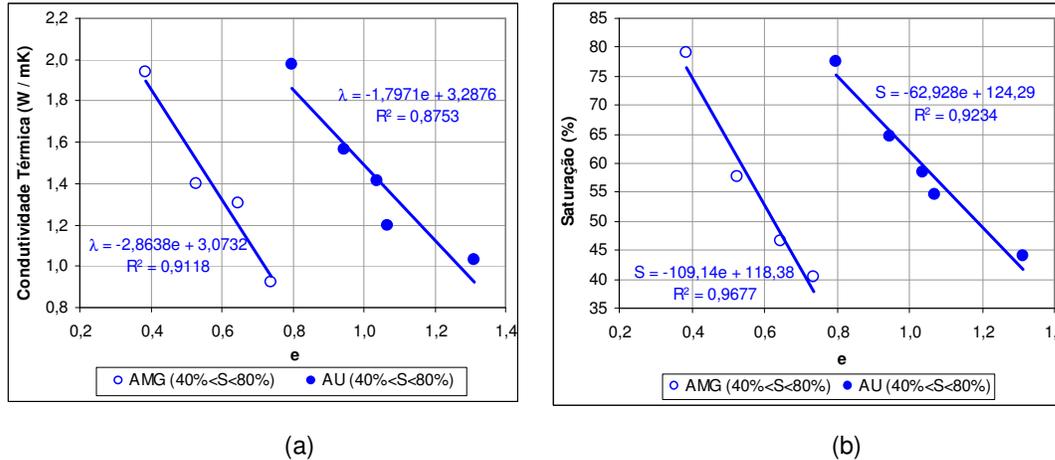


Figura 34 – Curvas de condutividade térmica x índice de vazios (a), índice de vazios x grau de saturação (b) – AMG e AU não saturadas (40% < S < 80%).

Observa-se a partir da Figura 34(a) e (b) que o comportamento apresentado pelas duas areias com umidades e graus de saturação mais elevados foi o mesmo apresentado anteriormente, ou seja, quanto maior o índice de vazios, menor o grau de saturação (b), e menor condutividade térmica (a).

Os resultados encontrados variaram de 0,93 a 1,94 W/mK para índices de vazios de 0,74 a 0,39 para a Areia Mal Graduada. Para a Areia Uniforme, os resultados variaram de 1,03 a 1,98 W/mK para índices de vazios de 1,31 a 0,80. Observa-se que esses resultados foram um pouco maiores que os anteriores para as duas areias não saturadas com umidades mais baixas, pois as umidades e graus de saturação mais elevados melhoraram ainda mais os contatos entre as partículas.

As areias também foram ensaiadas saturadas. Dessa forma, a variação do índice de vazios provocou também a variação da umidade para um mesmo grau de saturação. A Tabela 19 e a Tabela 20 apresentam os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de condutividade térmica obtidos.

Tabela 19 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AMG saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
AMG (S=100%)	01	28,11	99,35	0,75	1,51	2,20
	02	27,22	98,66	0,75	1,51	2,48
	03	22,20	99,57	0,63	1,62	2,67
	04	20,38	99,75	0,59	1,67	2,38
	05	16,73	99,28	0,48	1,79	2,69

Tabela 20 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AU saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
AU (S=100%)	01	50,00	100,00	1,32	1,14	1,92
	02	47,00	99,34	1,25	1,18	1,89
	03	35,90	98,39	0,97	1,35	1,96
	04	35,23	99,45	0,97	1,34	2,03

Os resultados de condutividade térmica em função da variação do índice de vazios e em função da umidade para saturação de 100% estão apresentados na Figura 35.

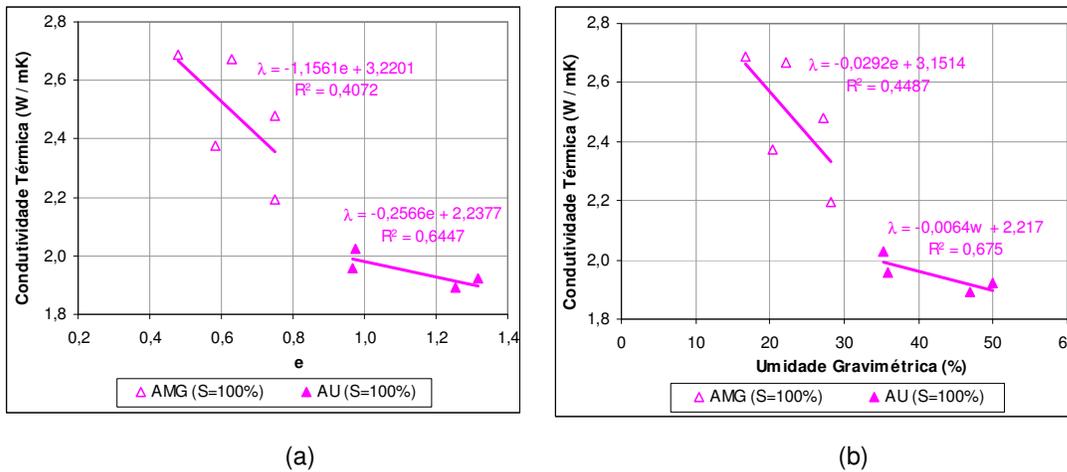


Figura 35 – Curvas de condutividade térmica x índice de vazios (a), condutividade térmica x umidade gravimétrica (b) – AMG e AU saturadas.

Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 35(a) mostram o mesmo comportamento já apresentado anteriormente para a condutividade térmica em função da variação do índice de vazios, ou seja, quanto maior o índice de vazios, menor a condutividade térmica dos solos.

A Figura 35(b) mostra que a condutividade térmica dos solos diminui com a elevação do teor de umidade, o que em princípio não estaria coerente. Entretanto, como o material está saturado, ou seja, com todos os vazios preenchidos por água, quando se aumenta o índice de vazios, aumenta-se o volume de água no solo (Figura 36) e afastam-se as partículas sólidas umas das outras, por isso a condutividade cai com o aumento da umidade. Além disso, a água possui condutividade térmica 14 vezes menor que o quartzo.

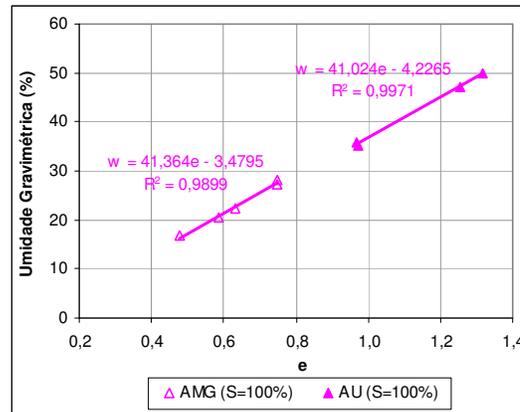


Figura 36 – Curva de umidade gravimétrica x índice de vazios – AMG e AU saturadas.

Os resultados encontrados apresentaram valores de condutividade térmica mais elevados do que os encontrados para as areias secas e não saturadas e variaram de 2,20 a 2,69 W/mK para a Areia Mal Graduada com índices de vazios variando de 0,75 a 0,48. Já a Areia Uniforme apresentou valores variando de 1,89 a 2,03 W/mK para índices de vazios de 1,25 a 0,97.

É importante observar a partir do gráfico da Figura 35(a) que nos ensaios com a Areia Mal Graduada (AMG) no estado saturado a sonda térmica forneceu valores de condutividade térmica acima do seu limite, 2,0 W/mK. Os ensaios foram repetidos para essa condição e a sonda forneceu novamente resultados acima de 2,0W/mK. O fabricante da sonda garante a confiabilidade dos resultados somente até 2,0 W/mK. Tal fato pode explicar a dispersão dos resultados encontrados. Para a Areia Uniforme (AU) saturada os resultados de condutividade encontrados foram próximos do limite da sonda para os índices de vazios máximo e mínimo.

É provável que o comportamento da Areia Mal Graduada (S=100%) esteja correto, mesmo com valores de condutividade térmica acima do limite da sonda. Fazendo essa consideração, a inclinação da reta que representa λ x e da Areia

Uniforme (S=100%) deveria estar próxima da AMG (S=100%), seguindo o mesmo padrão dos estágios de saturação anteriores, entretanto, a sonda não conseguiu obter medidas acima do seu limite.

Em geral, as duas areias apresentaram bons resultados de condutividade x índice de vazios, com tendências lineares apresentando coeficientes de correlação da ordem de 0,7. A exceção foi a areia AMG saturada, que apresentou coeficiente de correlação de 0,41, para a melhor curva de ajuste.

A Tabela 21 apresenta um resumo com os intervalos de valores de condutividade térmica obtidos em função da variação do grau de saturação e do índice de vazios para as duas areias ensaiadas, para todos os intervalos de graus de saturação estudados.

Tabela 21 – Intervalos de condutividade térmica em função da variação do índice de vazios e do grau de saturação – AMG e AU.

AMG			AU		
S (%)	e	λ (W/mK)	S (%)	e	λ (W/mK)
0	0,65 - 0,39	0,180 - 0,283	0	1,13 - 0,79	0,140 - 0,183
19 - 40	0,96 - 0,57	0,69 - 1,26	27 - 45	1,51 - 1,07	0,82 - 1,28
40 - 80	0,74 - 0,39	0,93 - 1,94	40 - 80	1,31 - 0,80	1,03 - 1,98
100	0,75 - 0,48	2,20 - 2,69	100	1,25 - 0,97	1,89 - 2,03

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 21 pôde-se observar que os valores obtidos de condutividade térmica para as areias estão próximos da faixa de valores apresentados na literatura consultada. Hukseflux (2005) apresenta para areia seca, úmida e saturada, intervalos de 0,15 a 0,25 W/mK, 0,25 a 2,00 W/mK e 2,00 a 4,00 W/mK, respectivamente. Abu-Hamdeh e Reeder (2000) estudaram, entre outros solos, uma areia e obtiveram valores de condutividade variando entre 0,6 e 1,95 W/mK, para massas específicas de 1,25 a 1,6 g/cm³ e umidades de 1,4% a 3,3%. Oliveira Júnior (1993) trabalhou com uma areia fabricada a partir de granito moído e encontrou valores de condutividade térmica crescentes com o aumento do grau de saturação até 70%, mantendo-se constante a partir de então. Os valores encontrados pelo autor variaram de 0,56 a 2,07 W/mK para graus de saturação entre 0 e 83% e uma densidade seca média de 1,96g/cm³.

A Figura 37 apresenta um gráfico reunindo todas as relações de condutividade térmica em função da variação do índice de vazios já apresentadas para as duas areias em todos os estados de saturação estudados.

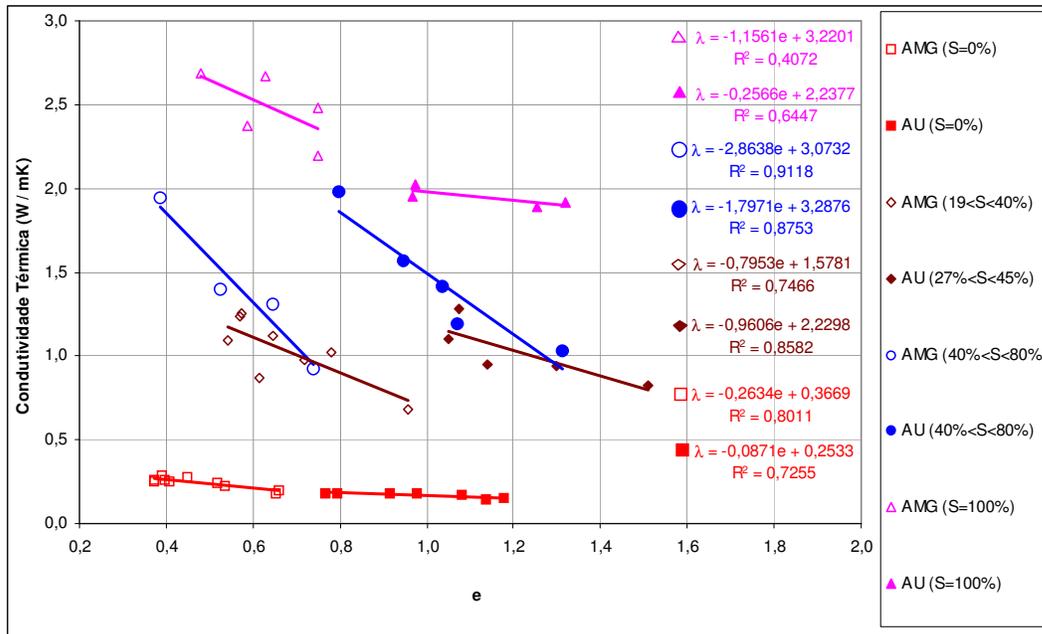


Figura 37 – Curvas de condutividade térmica x índice de vazios – AMG e AU em diferentes graus de saturação e umidades gravimétricas.

A Figura 37 mostra que quanto maior o teor de umidade e o grau de saturação das areias, maior a sua capacidade de conduzir calor.

Pode-se observar ainda através dos resultados apresentados na Figura 37 que quanto maior o teor de umidade e o grau de saturação, maior a inclinação das retas de λ x índice de vazios, ou seja, com o aumento da quantidade de água, uma pequena mudança no índice de vazios acarreta em variação significativa na capacidade do solo de conduzir calor. Para o material saturado essa influência da variação do índice de vazios nos valores de condutividade térmica diminui, ou seja, a inclinação da reta diminui em relação às anteriores, pois todos os vazios já estão preenchidos por água.

A Figura 38 apresenta para as duas areias estudadas as relações entre a condutividade térmica e o teor de umidade gravimétrica para um mesmo índice de vazios, comparando com outros índices de vazios. Os dados utilizados para a confecção destes gráficos estão agrupados e listados na Tabela 22 e na Tabela 23, para a Areia Mal Graduada e para a Areia Uniforme, respectivamente.

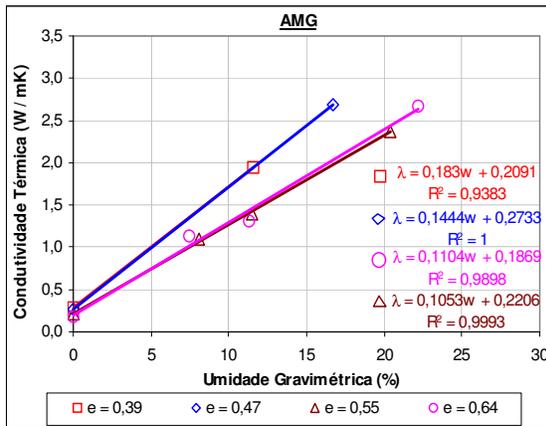
Tabela 22 - Variação da condutividade térmica em função da variação do teor de umidade para um mesmo índice de vazios e para índices de vazios diferentes – AMG.

CP	e	λ (W/mK)	w (%)
01	0,39	0,28	0,00
02	0,39	1,94	11,58
01	0,45	0,27	0,00
02	0,48	2,69	16,73
01	0,54	0,22	0,00
02	0,54	1,09	8,06
03	0,53	1,40	11,47
04	0,59	2,38	20,38
01	0,65	0,18	0,00
02	0,65	1,12	7,47
03	0,65	1,30	11,35
04	0,63	2,67	22,20

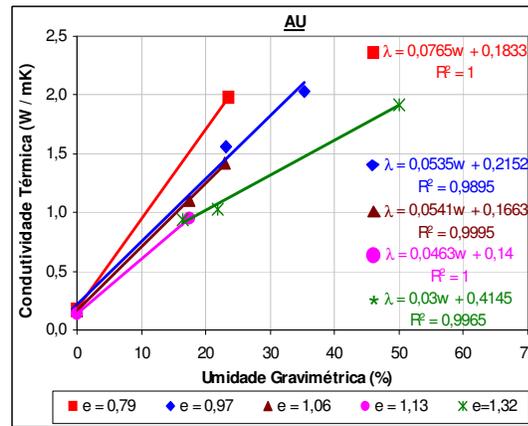
Tabela 23 – Variação da condutividade térmica em função da variação do teor de umidade para um mesmo índice de vazios e para índices de vazios diferentes – AU.

CP	e	λ (W/mK)	w(%)
01	0,79	0,18	0,00
02	0,80	1,98	23,44
01	0,98	0,18	0,00
02	0,95	1,57	23,13
03	0,97	2,03	35,23
01	1,08	0,17	0,00
02	1,05	1,10	17,55
03	1,04	1,42	22,88
01	1,13	0,14	0,00
02	1,14	0,95	17,55
01	1,30	0,94	16,47
02	1,31	1,03	21,77
03	1,32	1,92	50,00

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410791/CA



(a)



(b)

Figura 38 – Curvas de condutividade térmica x umidade gravimétrica – AMG e AU para diferentes índices de vazios.

A Figura 38 está indicando que quanto maior o teor de umidade, para um mesmo índice de vazios, maior a condutividade térmica da Areia Mal Graduada e da Areia Uniforme.

Pode-se observar também que quanto menor o índice de vazios, maior é a influência da variação do teor de umidade das areias nos valores de condutividade térmica, ou seja, quanto menor o índice de vazios, pequenos acréscimos no teor de umidade elevam de forma significativa a capacidade do solo de conduzir calor, aumentando assim a inclinação da reta condutividade térmica x umidade gravimétrica.

A Figura 38(a) mostra para a Areia Mal Graduada, que para menores índices de vazios esta influência da variação do teor de umidade na condutividade térmica é praticamente a mesma, assim como para índices de vazios maiores. A Areia Uniforme, Figura 38(b), não apresentou esse comportamento, ou seja, a inclinação da reta $\lambda \times w$ continuou diminuindo com o aumento do índice de vazios. Se comparadas as duas areias, como a Areia Uniforme apresenta índices de vazios mais elevados, as inclinações das curvas $\lambda \times w$ são menores que as da Areia Mal Graduada.

Pode-se observar também que a influência da variação do teor de umidade e do grau de saturação é mais significativa do que a variação do índice de vazios nos valores de condutividade térmica.

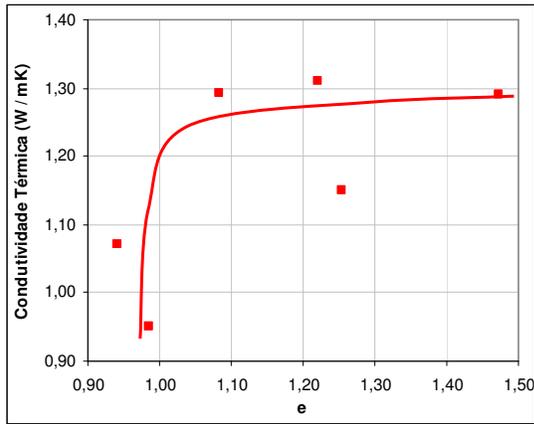
5.1.2. Solos C100 e C80

Os corpos de prova do solo C100 foram confeccionados e ensaiados de acordo com o que foi descrito nos itens 4.1.2. e 4.2.1.1, respectivamente. Após a compactação estática, os corpos de prova foram secos ao ar a uma temperatura média de 22^oC. Trabalhou-se com os solos inicialmente saturados, variando-se o índice de vazios e a umidade gravimétrica a partir da secagem ao ar dos corpos de prova.

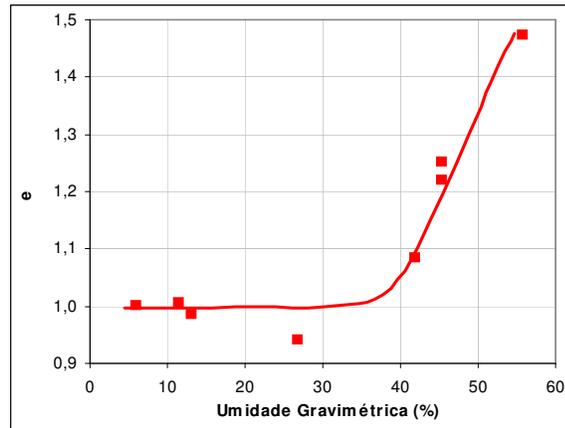
A Tabela 24 traz os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de condutividade térmica obtidos para cada um deles. A Figura 39 apresenta os gráficos gerados a partir das relações obtidas entre condutividade térmica, índice de vazios, umidade gravimétrica e grau de saturação.

Tabela 24 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – C100.

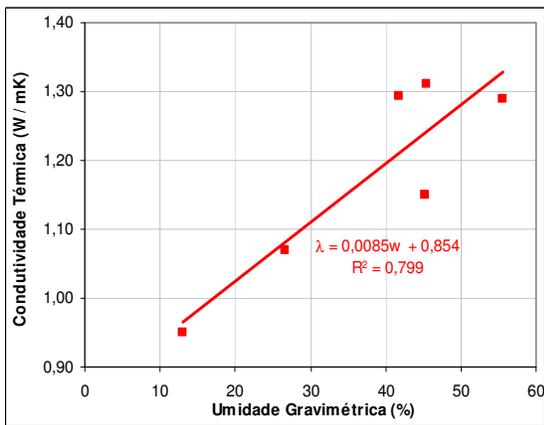
CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ (W/mK)
01	55,65	99,65	1,47	1,07	1,29
02	45,40	98,11	1,22	1,19	1,31
03	45,29	95,29	1,25	1,17	1,15
04	41,77	100,00	1,08	1,27	1,31
05	26,70	74,77	0,94	1,36	1,07
06	12,98	34,74	0,99	1,33	0,95
07	11,38	29,85	1,01	1,31	-
08	5,86	15,43	1,00	1,32	-



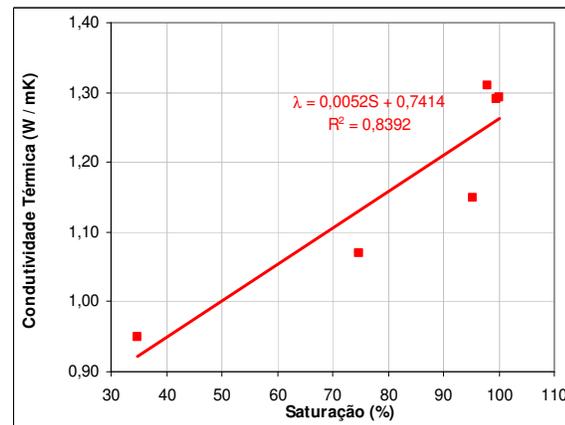
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 39 – Curvas de Condutividade térmica x índice de vazios (a), umidade gravimétrica x índice de vazios (b), condutividade térmica x umidade gravimétrica (c) e condutividade térmica x grau de saturação (d) – C100.

Observa-se a partir da Figura 39(a) que a relação entre a condutividade térmica e o índice de vazios do solo C100 apresentou-se bastante dispersa. Em geral, há uma tendência de crescimento da condutividade térmica com o

aumento do índice de vazios, o contrário do que aconteceu com as areias. Tal fato pode ser explicado pelo gráfico apresentado na Figura 39(b), que mostra que quanto maior o índice de vazios, maior a umidade gravimétrica do solo. A Figura 39(b) também mostra que para umidades mais baixas, a partir de aproximadamente 35%, o solo tende a ficar com volume constante, ou seja, não sofre mais retração e redução do índice de vazios. Um aumento da umidade gravimétrica e do grau de saturação do solo aumentam a sua capacidade de conduzir calor, conforme Figura 39(c) e (d), respectivamente.

Durante a secagem ao ar ocorre uma redução de volume (diminuição do índice de vazios) significativa dos corpos de prova, característica de materiais argilosos, que sofrem retração com a perda de umidade. Houve uma redução de 7,5% no diâmetro e de 13% na altura do corpo de prova com 10 dias de secagem. A redução do índice de vazios e conseqüente elevação da massa específica a umidades constantes causaria um aumento da condutividade térmica do material devido ao maior número de contatos entre os grãos. Por outro lado, diminuindo-se o teor de umidade e mantendo-se o índice de vazios constante, provavelmente se observaria, de forma menos dispersa, uma redução na capacidade do solo de conduzir calor causada pela substituição da água presente nos vazios pelo ar, que possui menor condutividade térmica. Os efeitos contrários na condutividade térmica causados pela redução simultânea do teor de umidade e do índice de vazios são, provavelmente, responsáveis pela dispersão no gráfico $\lambda \times e$ e do solo C100.

Observa-se na Figura 39(a) e na Figura 39(b) que existem 03 pontos nos gráficos com condutividades térmicas praticamente iguais a 1,3 w/mK variando o índice de vazios e o teor de umidade gravimétrica. A Figura 39(d) mostra que esses mesmos pontos têm praticamente o mesmo grau de saturação de 100%. De acordo com estes resultados, isto pode indicar que quando o material está saturado ou próximo da saturação, as variações do índice de vazios e da umidade influenciam pouco nos valores de condutividade térmica.

Não foi possível se obter resultados de parâmetros térmicos dos corpos de prova secos ao ar durante 08 e 10 dias (cp_s 07 e 08), pois o material adquiriu uma rigidez elevada durante a secagem que não permitiu a inserção da sonda térmica para a execução dos ensaios, nem mesmo fazendo-se um pré-furo com o auxílio de uma broca.

Observa-se que a condutividade térmica neste solo se apresentou mais sensível à variação de umidade do que à variação do índice de vazios, pois mesmo aumentando sua massa específica seca com a secagem do corpo de

prova, o solo reduziu sua capacidade de transmitir calor devido à saída de água dos seus vazios.

Os resultados de condutividade térmica obtidos experimentalmente variaram entre 0,95 e 1,29 W/mK, para umidades de 12,98% a 55,65%, índices de vazios de 0,99 a 1,47 e densidades secas de 1,33 a 1,07 g/cm³, respectivamente. Tais resultados estão de acordo com os apresentados na literatura consultada. Hukseflux (2005) apresenta para argila de seca a úmida valores de 0,15 a 1,80 W/mK. Reno e Winterkorn (1967) estudaram uma argila caulínica natural e encontraram condutividades térmicas variando de 0,13 a 1,38 W/mK para densidades secas de 0,66 a 1,25 g/cm³ e umidades de 3,8% a 32,3%. Krishnaiah e Singh (2003) encontraram para um Caulim condutividades de 0,12 a 0,63 W/mK para umidades de 0 e 31,0% e densidades secas variando de 0,78 a 1,28 g/cm³, respectivamente.

O solo C100 também foi ensaiado seco em forma de pó (umidade higroscópica) e na condição de lama (saturado). Os dados dos corpos de prova e os resultados encontrados de condutividade térmica obtidos estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Condutividade térmica do solo C100 na umidade higroscópica e saturado.

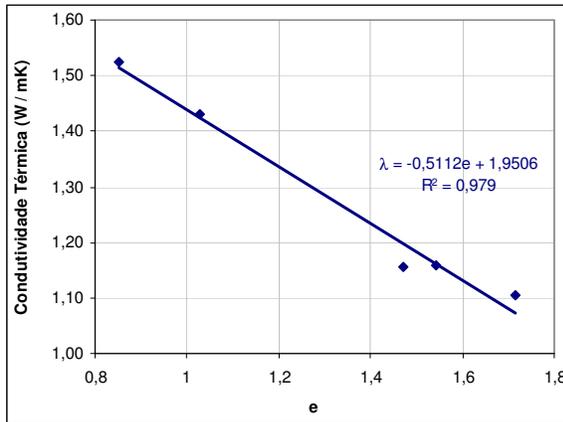
	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
Umidade Higroscópica (pó)	1,91	1,70	2,97	0,66	0,07
Saturado (LL)	73,16	99,91	1,93	0,90	0,97

Os corpos de prova do solo C80, composto por 80% de Caulim e 20% de Bentonita, foram confeccionados e ensaiados de acordo com o que foi descrito nos itens 4.1.2 e 4.2.1.1. Após a compactação estática, os corpos de prova foram secos ao ar a uma temperatura média de 22^oC. Trabalhou-se com os solos inicialmente saturados, variando-se o índice de vazios e a umidade gravimétrica a partir da secagem ao ar dos corpos de prova. A Tabela 26 traz os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de condutividade térmica obtidos para cada um deles.

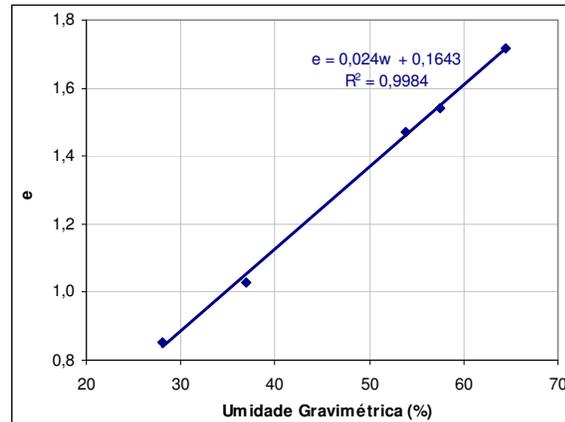
A Figura 40 apresenta os gráficos gerados a partir das relações obtidas entre condutividade térmica, índice de vazios, umidade gravimétrica e grau de saturação.

Tabela 26 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – C80.

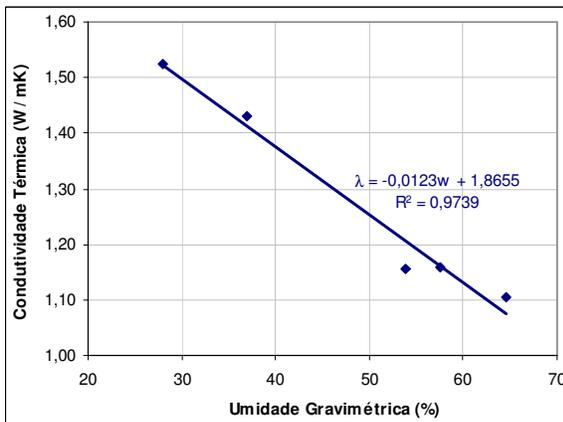
CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d (g/cm ³)	λ (W/mK)
01	64,54	100,00	1,72	0,98	1,11
02	57,54	99,21	1,48	1,07	1,16
03	53,90	97,45	1,54	1,05	1,16
04	36,91	95,38	1,03	1,31	1,43
05	28,02	87,50	0,85	1,44	1,52
06	20,84	76,58	0,72	1,54	-



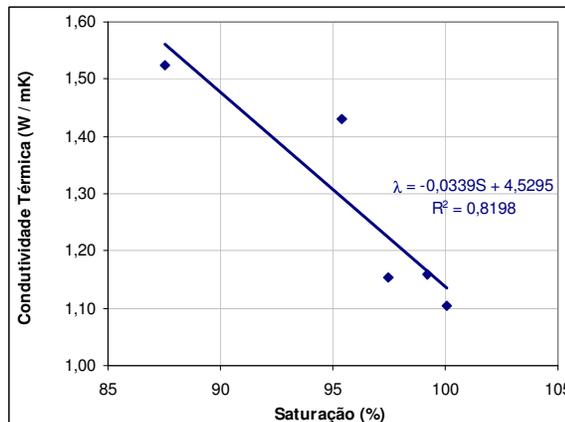
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 40 – Condutividade térmica x índice de vazios (a), umidade gravimétrica x índice de vazios (b), condutividade térmica x umidade gravimétrica (c) e condutividade térmica x grau de saturação (d) – C80.

Observa-se a partir da Figura 40(a) que a relação entre a condutividade térmica e o índice de vazios do solo C80 apresentou-se de forma contrária à do solo C100, ou seja, a condutividade térmica do solo diminuiu com o aumento do índice de vazios, o que pode ser explicado pelo fato de que a elevação do índice

de vazios afasta as partículas sólidas reduzindo sua capacidade de conduzir calor. Tal fato também pode ser explicado pelo gráfico apresentado na Figura 40(b), que mostra que quanto maior o índice de vazios, maior a umidade gravimétrica do solo.

Um aumento da umidade gravimétrica do solo deveria provocar um aumento na condutividade térmica, pois, conforme já discutido, a água conduz melhor o calor do que o ar. Entretanto, como este solo é composto por Bentonita, a água presente nos vazios produz um efeito contrário nos resultados de condutividade térmica para umidades e graus de saturação elevados, Figura 40(c) e (d). Por ser um material extremamente expansivo, como já foi apresentado anteriormente, a Bentonita de úmida a saturada possui uma camada de água adsorvida bastante espessa, o que afasta as partículas sólidas umas das outras e reduz a sua capacidade de conduzir calor, ao contrário do Caulim (C100), que praticamente não adsorve água e, portanto, tem a água entre os grãos melhorando os seus contatos. É provável que o solo C80, se tivesse sido ensaiado com umidades e índices de vazios mais baixos, apresentasse resultados menores de condutividade térmica, ou seja, as curvas apresentadas nas Figuras (a), (c) e (d), apresentariam uma inclinação positiva para umidades mais baixas, seguindo o mesmo padrão de comportamento apresentado pelo solo C100. Além disso, essa Bentonita, especificamente, possui um teor de sais solúveis bastante significativo, de acordo com a sua análise química apresentada no item 3.3.2, o que também influencia negativamente na condução de calor através do solo.

Durante a secagem ao ar ocorreu uma redução de volume (diminuição do índice de vazios) significativa dos corpos de prova. Houve uma redução de 9,3% no diâmetro e de 14,3% na altura do corpo de prova com 10 dias de secagem, mostrando maior retração do solo pelo acréscimo de uma argila expansiva (Bentonita) em sua composição. A redução do índice de vazios e conseqüente elevação da massa específica a umidades constantes causa um aumento da condutividade térmica do material devido ao maior contato entre os grãos.

Não foi possível se obter resultados de parâmetros térmicos para o corpo de prova seco por 13 dias (cp 06), pois o material adquiriu uma rigidez elevada durante a secagem que não permitiu a inserção da sonda térmica para a execução dos ensaios.

Os resultados de condutividade térmica obtidos experimentalmente variaram entre 1,11 e 1,52 W/mK, para umidades de 64,54% a 28,02%, índices de vazios de 1,72 a 0,85 e densidades secas de 0,98 a 1,44 g/cm³,

respectivamente. Tang e Cui (2006) encontraram para uma Bentonita condutividades de 0,45 a 1,00 W/mK para umidades médias de 8,7% a 17,7% e densidades secas médias variando de 1,48 a 1,75 g/cm³, respectivamente.

A Bentonita pura também foi ensaiada seca em forma de pó (umidade higroscópica) e na condição de lama (saturada). Os dados dos corpos de prova e os resultados encontrados de condutividade térmica obtidos estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Condutividade térmica da Bentonita na umidade higroscópica e saturada.

	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
Umidade Higroscópica (pó)	14,03	10,59	3,82	0,60	0,06
Saturada (LL)	425,39	99,36	12,35	0,22	0,63

Os corpos de prova dos solos CB40 e CB60, compostos por 40% de Caulim+Bentonita e 60% de areia e 60% de Caulim+Bentonita e 40% de areia, respectivamente, foram confeccionados da mesma forma anteriormente já discutida. Os corpos de prova desses dois solos secaram ao ar no sentido de fora pra dentro de maneira não uniforme. As umidades no centro (interna) e nas extremidades (externa) dos corpos de prova apresentaram diferenças significativas e as suas dimensões apresentaram grandes diferenças ao longo dos mesmos. A secagem também provocou fissuramento ao longo do diâmetro dos corpos de prova, fazendo com que o centro ficasse oco em alguns casos. A Figura 41 apresenta fotografias de corpos de prova dos solos CB40 (a), seco por 09 dias e CB60 (b), seco por 04 dias.

Todos os corpos de prova foram ensaiados, entretanto, os resultados obtidos não foram analisados, pois não são confiáveis. Apenas os corpos de prova saturados apresentaram resultados confiáveis. A Tabela 28 traz os dados dos corpos de prova ensaiados, os resultados de condutividade térmica obtidos para cada um deles e mostra que os corpos de prova dos dois solos saturados apresentaram mesmo índice de vazios e mesma massa específica seca.

Tabela 28 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – CB40 e CB60 saturados.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK
CB40	01	57,73	100,00	1,56	1,06	1,20
CB60	01	57,06	100,00	1,56	1,07	1,14

O solo CB40 apresentou condutividade térmica mais elevada que o solo CB60. Como as umidades gravimétricas estão próximas, sendo a do solo CB40 ligeiramente maior, é provável que o resultado apresentado se deva ao fato de o solo CB40 possuir uma porcentagem de areia mais elevada que o solo CB60, visto que o quartzo é o mineral de maior condutividade térmica conhecido.

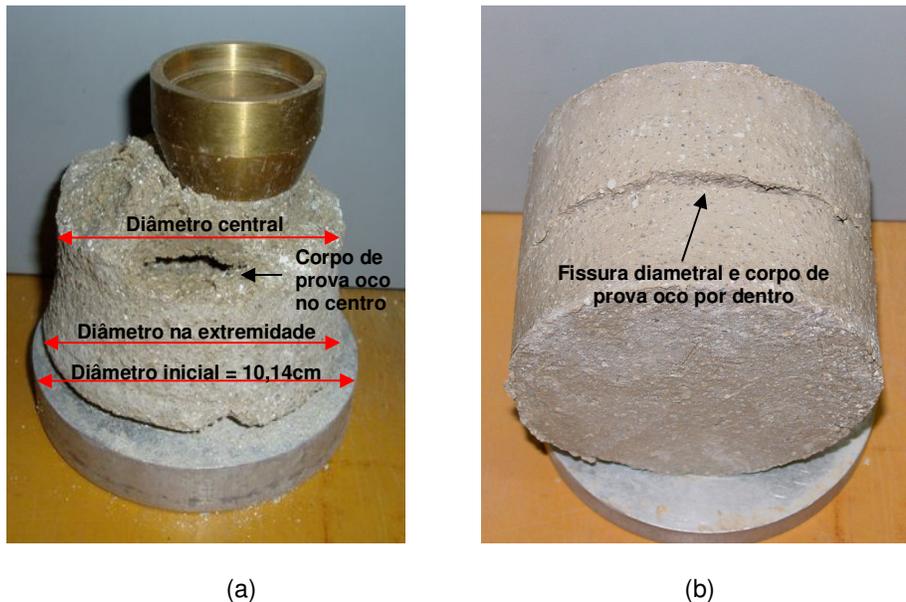


Figura 41 – Corpo de prova do solo CB40 após 09 dias de secagem (a) e corpo de prova do solo CB60 após 04 dias de secagem (b).

Os solos C60, C40 e CB80 não foram ensaiados devido a limitações na altura das prensas de adensamento para compactação estática e nas dimensões dos moldes de compactação para a confecção dos corpos de prova. A Bentonita presente na composição desses solos tornou as misturas bastante expansivas quando saturadas, não permitindo a confecção dos corpos de prova.

5.1.3. Estimativa de Condutividade Térmica de Solos

Existem na literatura algumas propostas para previsão do comportamento da condutividade térmica dos solos em função do grau de saturação e da umidade gravimétrica. Para os dados obtidos nesta pesquisa foram utilizadas três previsões desse comportamento, as de Kersten (1949), Johansen (1975) e Ewen (1988).

Conforme discutido no Capítulo 2, Kersten (1949) estudou a relação entre a condutividade térmica e a quantidade de água presente em solos naturais, e

através de uma equação empírica que não se aplica a solos secos, mostrou que a condutividade térmica está linearmente relacionada com o logaritmo do teor de umidade para uma densidade seca constante. Para solos siltosos e argilosos contendo 50% ou mais de silte e argila, a equação de kersten é:

$$\lambda = 0,1442 \cdot (0,9 \log w - 0,2) \cdot 10^{0,6243\rho_d}, \text{ para } w \geq 7\% \quad (42)$$

Para solos arenosos (areias limpas), o autor propõe:

$$\lambda = 0,1442 \cdot (0,7 \log w + 0,4) \cdot 10^{0,6243\rho_d}, \text{ para } w \geq 1\% \quad (43)$$

onde:

λ – condutividade térmica (W / m K)

w – teor de umidade em porcentagem

ρ_d - massa específica seca do solo (g / cm³)

Johansen (1975), conforme também discutido no Capítulo 2, desenvolveu uma formulação para determinar a condutividade térmica de solos não saturados, através de uma equação que interpola as condutividades térmicas do solo nos estados seco (λ_{seco}) e saturado ($\lambda_{saturado}$):

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{seco}) \cdot K_e + \lambda_{seco} \quad (44)$$

$$\lambda_{seco} = \frac{0,135\rho_d + 64,7}{2700 - 0,947\rho_d} \quad (45)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_{\acute{a}gua}^{(n)} \quad (46)$$

$$\lambda_s = \lambda_q^{(q)} \cdot \lambda_o^{(1-q)} \quad (47)$$

onde:

λ , λ_q , λ_o – condutividade térmica do solo, do quartzo, de outros minerais e condutividade térmica efetiva dos sólidos, respectivamente (W / m K)

K_e – número de Kersten (adimensional)

n – porosidade

O número de Kersten K_e é determinado da seguinte forma:

$$K_e \cong 0,7 \log S + 1, \text{ para } S > 0,05 \text{ e solos granulares e} \quad (48)$$

$$K_e \cong \log S + 1, \text{ para } S > 0,1 \text{ e solos finos} \quad (49)$$

Para o cálculo da condutividade térmica saturada das areias utilizou-se o valor de condutividade térmica do quartzo sugerido pelo autor, ou seja, 7,7 W/m K, e fração do mesmo (q) nos sólidos totais igual a 1,0.

Ewen (1988) propôs uma equação empírica que relaciona exponencialmente a condutividade térmica dos solos com o grau de saturação ou com a umidade gravimétrica:

$$\lambda = A + B \cdot [1 - \exp(C \cdot S)] \text{ ou } \lambda = A + B \cdot [1 - \exp(C \cdot w)] \quad (50)$$

onde:

A, B e C – parâmetros obtidos para o ajuste dos dados experimentais

S e w – grau de saturação e umidade gravimétrica

5.1.3.1. Areia Uniforme e Areia Mal Graduada

A Figura 42 e a Figura 43 apresentam os resultados obtidos a partir das fórmulas de Kersten e Johansen para a Areia Mal Graduada (AMG) e a Areia Uniforme (AU), respectivamente.

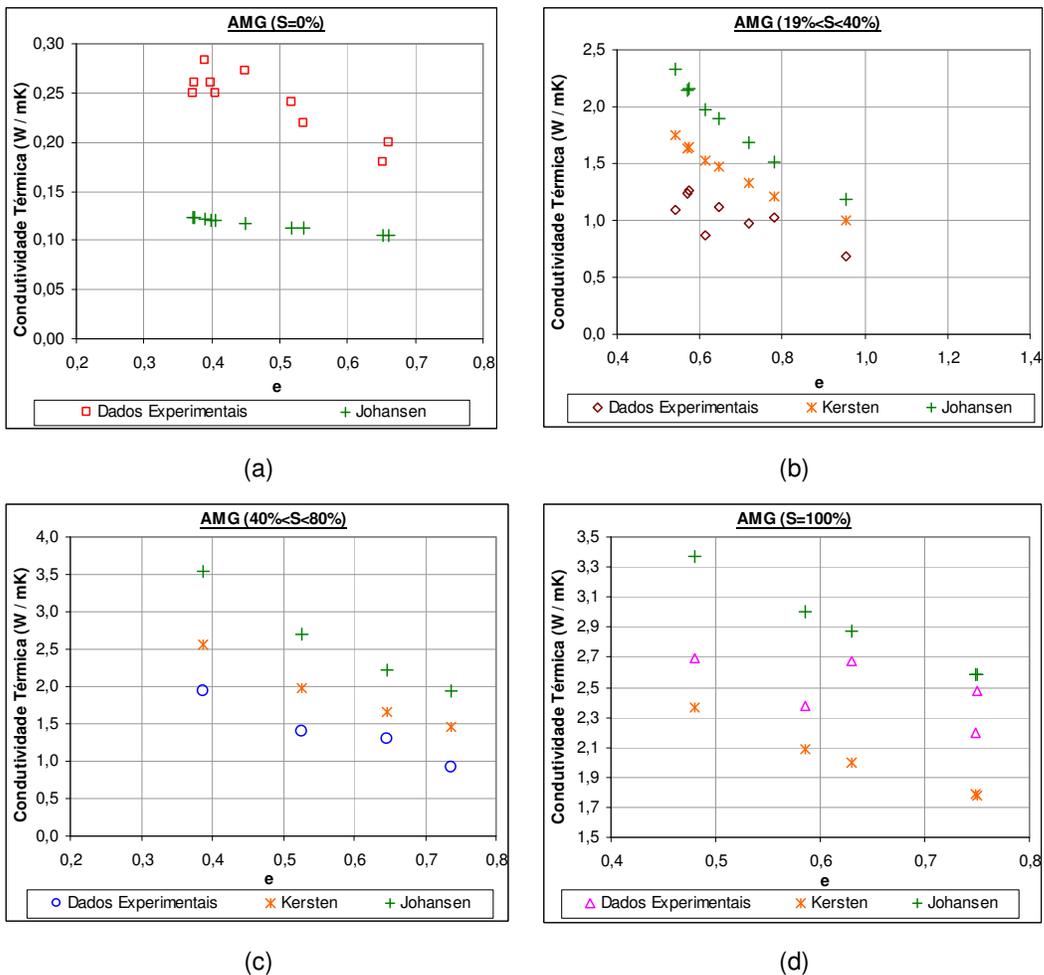


Figura 42 – Previsões da condutividade térmica da Areia Mal Graduada pelos métodos de Kersten (1949) e Johansen (1975).

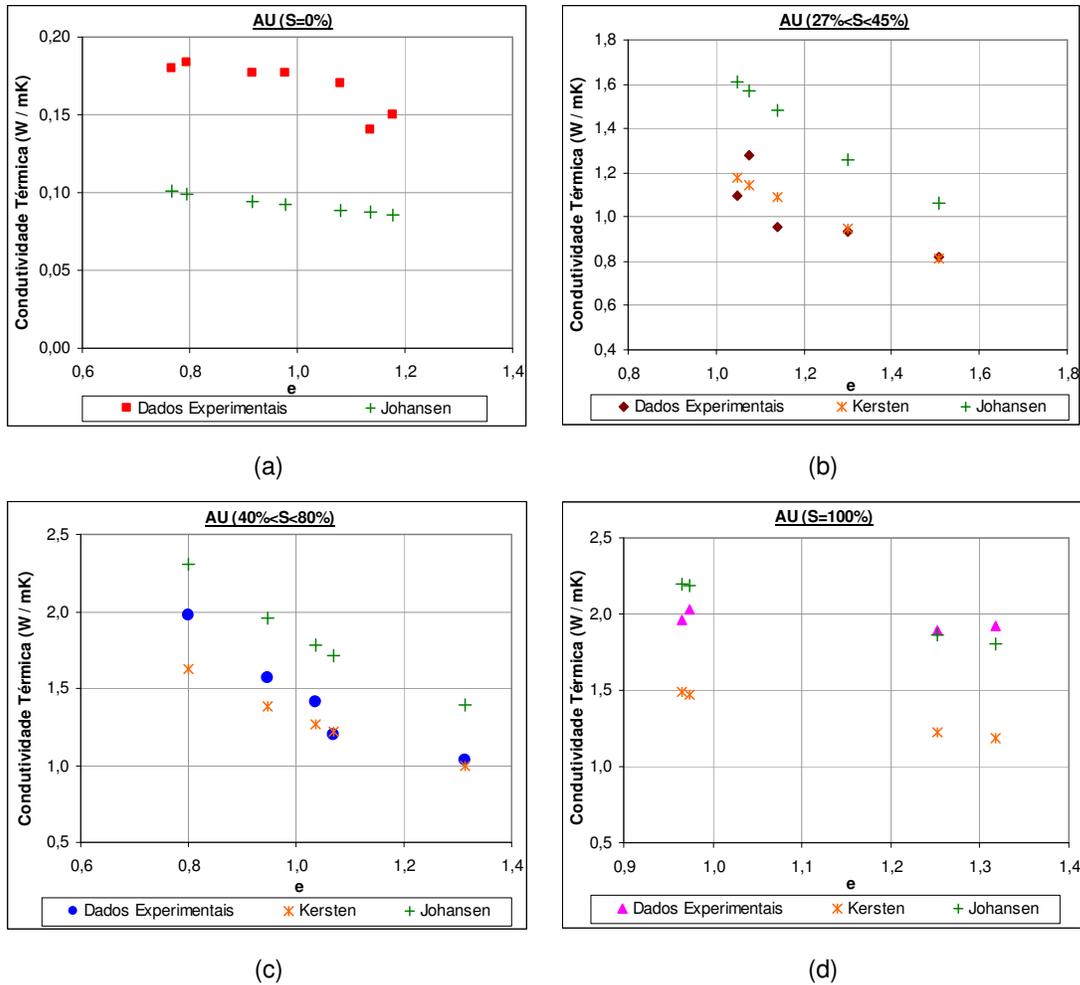


Figura 43 – Previsões da condutividade térmica da Areia Uniforme pelos métodos de Kersten (1949) e Johansen (1975).

A partir dos gráficos apresentados na Figura 42 e na Figura 43 pode-se observar que o método de Johansen (1975) estimou valores de condutividade térmica menores que os encontrados experimentalmente para as duas areias secas. Por outro lado, para as duas areias não saturadas, Johansen estimou valores mais elevados que os experimentais. Para a Areia Mal Graduada saturada, este método utilizado estimou valores acima dos encontrados experimentalmente. Já para a Areia Uniforme saturada, para índices de vazios menores, os valores estimados foram maiores que os dados experimentais, e para os índices de vazios mais elevados, os valores estimados foram menores.

O método de Kersten (1949) estimou para a Areia Mal Graduada não saturada valores mais elevados que os dados experimentais. Para a Areia Uniforme não saturada, alguns valores coincidiram e outros foram abaixo e

acima dos encontrados. No estado saturado, Kersten estimou para as duas areias valores menores que os encontrados experimentalmente.

A Tabela 29 apresenta para as duas areias a diferença média entre os resultados de condutividade térmica obtidos experimentalmente e os calculados através das duas formulações propostas por Kersten (1949) e Johansen (1975) e o desvio padrão.

Tabela 29 – Diferenças entre os dados experimentais de AMG e AU e as previsões de Kersten (1949) e Johansen (1975).

	AMG (S=0%)		AMG (19%<S<40%)		AMG (40%<S<80%)		AMG (S=100%)	
	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen
dif. média (%)	-	51,37	41,21	81,04	39,71	89,36	19,22	16,17
desv. padrão	-	4,70	18,43	25,76	13,71	16,97	7,45	10,10
	AU (S=0%)		AU (27%<S<45%)		AU (40%<S<80%)		AU (S=100%)	
	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen
dif. média (%)	-	44,66	6,51	37,65	9,10	29,00	31,19	6,92
desv. padrão	-	3,55	5,90	13,21	6,56	10,16	6,66	4,49

Observa-se a partir da Tabela 29 que a melhor aproximação de Kersten (1949) é para a Areia Uniforme (AU) não saturada, com diferenças médias entre os valores experimentais e os obtidos com a formulação de 6,51% e 9,10% e desvios padrões de 5,90 e 6,56, respectivamente. Por outro lado, as melhores aproximações de Johansen (1975) foram para as duas areias saturadas, sendo que AMG apresentou diferença média de 16,17% e desvio padrão de 10,10, enquanto a AU apresentou diferença média de 6,92% e desvio padrão de 1,33.

Segundo Farouki (1986), o método de Kersten subestima os valores de condutividade térmica para solos granulares com alto conteúdo de quartzo, o que se verificou apenas para as duas areias saturadas. Ainda segundo o autor, esse método deve ser aplicado somente a solos granulares com conteúdo de quartzo em torno de 60%. Farouki coloca que para graus de saturação acima de 30%, Kersten fornece valores com diferenças de $\pm 35\%$ em relação aos valores experimentais, já para graus de saturação abaixo de 30%, os valores apresentam diferenças excessivas, o que não ocorreu com as duas areias ensaiadas aqui, onde a diferença máxima foi de aproximadamente 41%, considerando-as saturadas e não saturadas.

O método de Johansen para estimar a condutividade térmica dos solos, de acordo com Farouki (1986), fornece melhor aproximação com os resultados experimentais para solos granulares quando os graus de saturação estão acima

de 20%, com diferenças em torno de 25%, o que não se verificou com as duas areias ensaiadas aqui.

Considerando que os valores para condutividade térmica de solos variam de 0,15 a 4,0 W/mK (Hukseflux, 2005), uma diferença de no mínimo 25% entre os valores estimados e os valores reais medidos pode acarretar em interpretações sobre o fluxo de calor nos solos que não condizem com a realidade. Essa diferença é mais significativa para solos com valores mais elevados de condutividade térmica, por exemplo, para o valor de 4,0 W/mK, 25% de diferença estimaria um valor com um erro bastante significativo de ± 1 W/mK. Entretanto, considerando-se 0,15 W/mK, 25% estimaria um valor mínimo de 0,11W/mK e um valor máximo de 0,19 W/mK.

Para ajustar a curva de Ewen (1988) aos dados experimentais das areias Mal Graduada (AMG) e Uniforme (AU), trabalhou-se com valores de condutividade térmica e graus de saturação médios para cada intervalo de graus de saturação. A Figura 44 apresenta o ajuste de Ewen para esses valores médios nas curvas que relacionam condutividade com o grau de saturação.

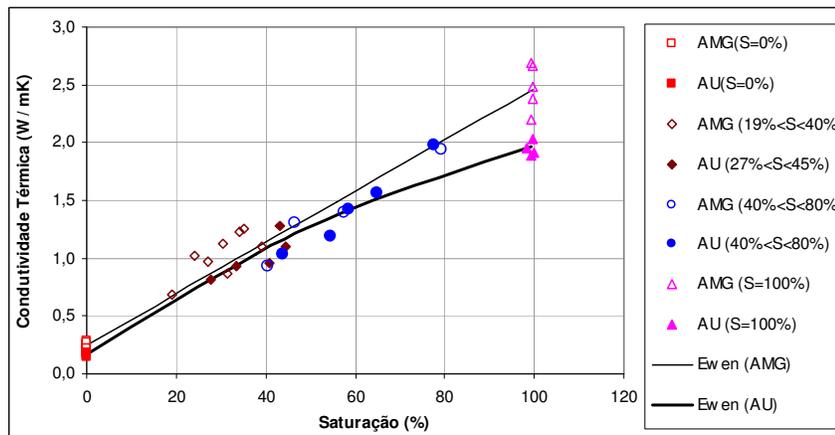


Figura 44 – Ajuste de Ewen (1988) aos dados experimentais de AMG e AU (valores médios).

Os parâmetros de Ewen que melhor ajustaram os dados experimentais da Areia Mal Graduada (AMG) foram $A=0,24$, $B=651,51$ e $C=-0,003$. Para a Areia Uniforme (AU), esses parâmetros foram $A=0,17$, $B=3,13$ e $C=-0,86$. As expressões de ajuste para essas duas areias estão listadas na Tabela 30.

Tabela 30 – Ajuste de Ewen (1988) para valores médios de condutividade térmica e grau de saturação.

Solo	Ajuste de Ewen (1988)
Areia Mal Graduada (AMG)	$\lambda = 0,24 + 651,51 \cdot [1 - \exp(-0,003 \cdot S)]$
Areia Uniforme (AU)	$\lambda = 0,17 + 3,13 \cdot [1 - \exp(-0,86 \cdot S)]$

Para comparar os ajustes de Ewen (1988) com os dados experimentais e os resultados fornecidos pelas formulações de Kersten (1949) e Johansen (1975), foram plotados gráficos de condutividade térmica x grau de saturação e condutividade térmica x umidade gravimétrica para os valores correspondentes aos índices de vazios máximos ($e_{m\acute{a}x}$) e índices de vazios mínimos ($e_{m\acute{i}n}$). A Figura 45 apresenta essas relações.

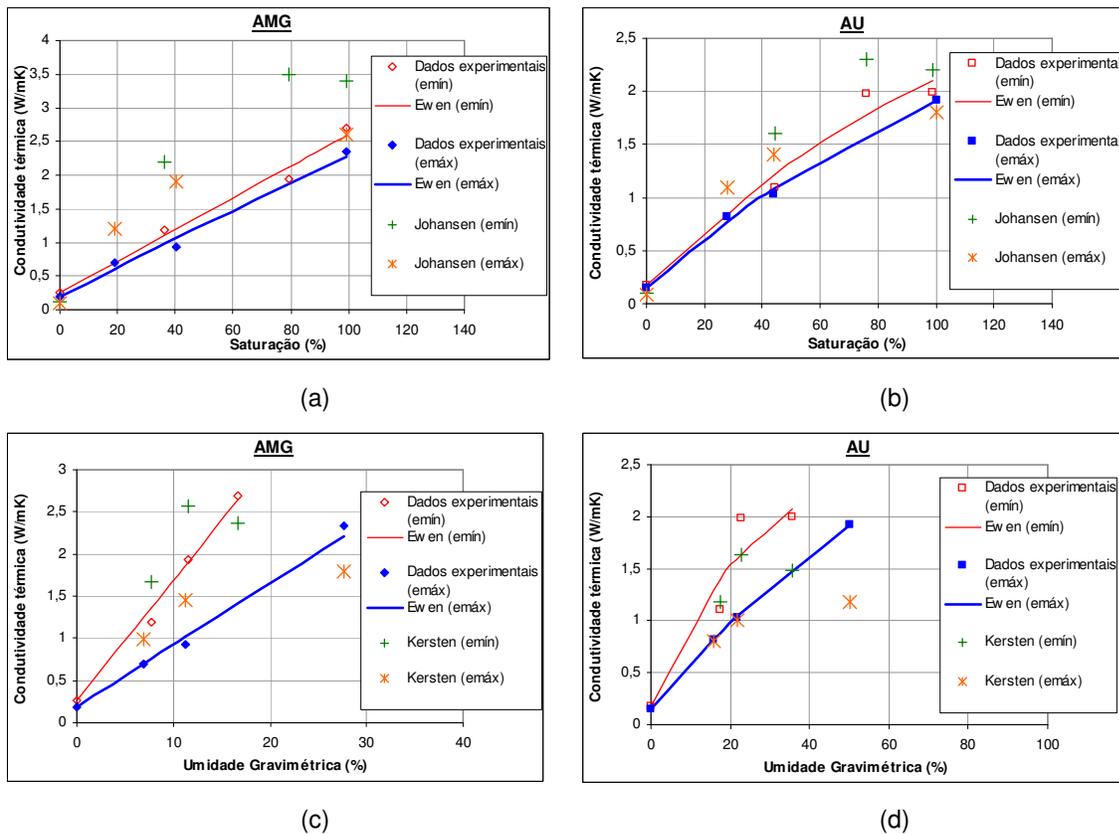


Figura 45 – Comparação entre ajuste de Ewen (1988) e previsões de Kersten (1949) e Johansen (1975) para índices de vazios máximo e mínimo das areias AMG e AU.

A partir dos resultados apresentados na Figura 45, observa-se que a equação de Ewen se ajusta bem à condutividade térmica dos dois solos em

relação ao grau de saturação e à umidade gravimétrica, principalmente para índices de vazios máximos.

A Tabela 31 apresenta as expressões de ajuste de Ewen para as duas areias nas condições apresentadas na Figura 45, com as respectivas diferenças entre os dados experimentais e os valores de ajuste obtidos.

Tabela 31 – Ajuste de Ewen para as areias Mal Graduada e Uniforme ($e_{m\acute{a}x}$ e $e_{m\acute{i}n}$).

Solo	Ajuste de Ewen (1988)	Diferença
	$\lambda = A + B \cdot [1 - \exp(C \cdot S)]$ ou $\lambda = A + B \cdot [1 - \exp(C \cdot w)]$	Média (%)
Areia Mal Graduada (AMG) - $e_{m\acute{i}n}$	$\lambda = 0,26 + 940,51 \cdot [1 - \exp(-0,002 \cdot S)]$	1,49
	$\lambda = 0,26 + 424,70 \cdot [1 - \exp(-0,03 \cdot w)]$	3,49
Areia Mal Graduada (AMG) - $e_{m\acute{a}x}$	$\lambda = 0,19 + 29,49 \cdot [1 - \exp(-0,07 \cdot S)]$	1,13
	$\lambda = 0,19 + 1123,58 \cdot [1 - \exp(-0,01 \cdot w)]$	3,85
Areia Uniforme (AU) - $e_{m\acute{i}n}$	$\lambda = 0,18 + 3,55 \cdot [1 - \exp(-0,78 \cdot S)]$	6,64
	$\lambda = 0,18 + 2,73 \cdot [1 - \exp(-3,34 \cdot w)]$	12,08
Areia Uniforme (AU) - $e_{m\acute{a}x}$	$\lambda = 0,15 + 3,52 \cdot [1 - \exp(-0,70 \cdot S)]$	2,79
	$\lambda = 0,15 + 4,30 \cdot [1 - \exp(-1,06 \cdot w)]$	0,36

Comparando-se as diferenças médias apresentadas na Tabela 31 com as diferenças médias apresentadas na Tabela 29 observa-se que o ajuste de Ewen, que apresenta diferença máxima de aproximadamente 12% entre os valores experimentais e os valores ajustados, prevê melhor o comportamento da condutividade térmica das areias do que as expressões de Kersten e Johansen. O inconveniente dessa equação é que para ajustá-la é necessário se ter os dados experimentais, ao contrário das outras duas.

5.1.3.2. Solos C100 e C80

Os métodos de Kersten (1949) e Johansen (1975) também foram aplicados para estimar a condutividade térmica dos solos C100 e C80. Aplicou-se o ajuste de Ewen aos resultados experimentais obtidos e os parâmetros A, B e C encontrados para C100 foram 0,73, 0,75 e -2,60, respectivamente. Para C80, os parâmetros A, B e C encontrados foram 1,78, 0,97 e 0,85,

respectivamente. A Figura 46 apresenta os resultados de condutividade térmica obtidos em função da variação da umidade gravimétrica.

As equações de Ewen obtidas para o solo C100 e C80 com diferenças médias de 3,89% e 2,0%, respectivamente, foram:

$$\lambda = 0,73 + 0,75 \cdot [1 - \exp(-2,6 \cdot w)], \text{ para C100 e}$$

$$\lambda = 1,78 + 0,97 \cdot [1 - \exp(0,85 \cdot w)], \text{ para C80}$$

Para estimar a condutividade térmica saturada dos solos C100 e C80 pelo método de Johansen utilizou-se o valor de condutividade térmica de outros minerais (λ_0) sugerido pelo autor, ou seja, 2,0 W/mK.

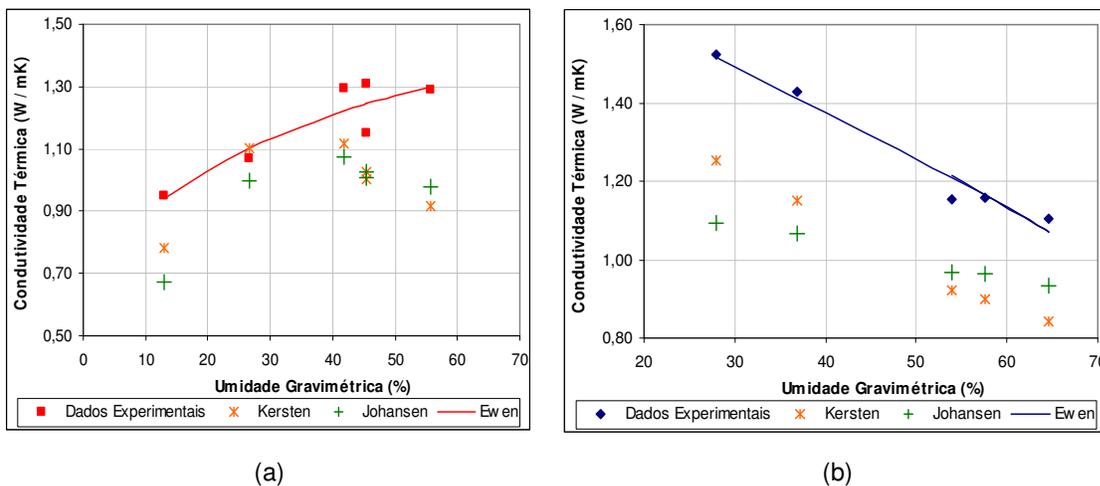


Figura 46 – Comparação entre ajuste de Ewen (1988), previsões de Kersten (1949) e Johansen (1975) com os dados experimentais do solo C100 (a) e C80 (b).

A Tabela 32 apresenta as diferenças médias e os desvios padrões entre os dados experimentais obtidos e os estimados através dos métodos de Kersten e Johansen para os solos C100 e C80.

Tabela 32 – Diferenças entre os dados experimentais dos solos C100 e C80 e as previsões de Kersten (1949) e Johansen (1975).

	C100		C80	
	Kersten	Johansen	Kersten	Johansen
dif. média (%)	16,31	18,59	20,82	20,44
desv. padrão	8,84	8,15	2,41	5,90

É importante observar que os métodos de Kersten e Johansen estimaram relativamente bem os resultados de condutividade térmica para os solos C100 e C80, pois apresentaram diferenças médias menores que 25%. Uma diferença de

18,5%, por exemplo, aplicada aos valores mínimo (0,95 W/mK) e máximo (1,31 W/mK) obtidos experimentalmente para o solo C100 estimaria 1,13 e 1,55 W/mK, respectivamente. Já para o solo C80, uma diferença de 20,82%, por exemplo, aplicada aos valores mínimo (1,11 W/mK) e máximo (1,52 W/mK) obtidos experimentalmente estimaria 1,34 e 1,84 W/mK, respectivamente. Conforme foi mencionado anteriormente, essa diferença é mais significativa para valores de condutividade mais elevados.

Em geral, os métodos de Kersten e Johansen estimaram melhor a condutividade térmica dos solos C100 e C80, evidenciando de repente uma melhor aplicação em solos argilosos. De acordo com Farouki (1986), o método de Johansen geralmente dá a melhor estimativa para solos finos do que para solos granulares. Segundo o autor, para graus de saturação acima de 20%, as diferenças são em torno de 35%, e para graus de saturação menores que 20%, as diferenças são de aproximadamente -45%.

O ajuste de curva de Ewen fornece valores de condutividade mais próximos aos encontrados experimentalmente, entretanto, para utilizá-la é necessário se ter os valores experimentais.

5.2. Calor Específico

Para estimar o calor específico dos solos estudados e ensaiados neste trabalho foi utilizada a formulação proposta por Abu-Hamdeh (2003), já apresentada no Capítulo 2:

$$c = \frac{\rho_d}{\rho} \cdot (c_s + w) \quad (51)$$

onde:

ρ – massa específica total do solo (g/cm^3)

ρ_d – massa específica seca do solo (g/cm^3)

w – umidade gravimétrica

c_s – calor específico dos sólidos do solo ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)

Os resultados de todos os solos estudados serão inicialmente apresentados separadamente e em seguida será feita uma comparação entre eles.

5.2.1.

Areia Mal Graduada e Areia Uniforme

As areias foram ensaiadas com diferentes graus de saturação e diferentes índices de vazios de acordo com a metodologia apresentada no item 4.2.2.1. Trabalhou-se com as areias secas, saturadas e não saturadas. O valor de c_s utilizado para os cálculos do calor específico foi $0,215 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$, sugerido para areias por Bristow (1998).

A Tabela 33 e a Tabela 34 apresentam os dados dos corpos de prova ensaiados e os respectivos resultados de calor específico obtidos para as areias Mal Graduada (AMG) e Uniforme (AU) secas, respectivamente.

Tabela 33 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AMG seca.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
AMG (S=0%)	01	0,00	0,00	0,37	1,93	0,250	0,215
	02	0,00	0,00	0,37	1,92	0,260	0,215
	03	0,00	0,00	0,39	1,90	0,283	0,215
	04	0,00	0,00	0,40	1,89	0,260	0,215
	05	0,00	0,00	0,41	1,88	0,250	0,215
	06	0,00	0,00	0,45	1,82	0,273	0,215
	07	0,00	0,00	0,52	1,74	0,240	0,215
	08	0,00	0,00	0,54	1,72	0,220	0,215
	09	0,00	0,00	0,65	1,60	0,180	0,215
	10	0,00	0,00	0,66	1,59	0,200	0,215

Tabela 34– Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AU seca.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
AU (S=0%)	01	0,00	0,00	0,77	1,50	0,180	0,215
	02	0,00	0,00	0,79	1,48	0,183	0,215
	03	0,00	0,00	0,92	1,38	0,177	0,215
	04	0,00	0,00	0,98	1,34	0,177	0,215
	05	0,00	0,00	1,08	1,27	0,170	0,215
	06	0,00	0,00	1,13	1,24	0,140	0,215
	07	0,00	0,00	1,18	1,22	0,150	0,215

A partir dos resultados apresentados nas tabelas acima, observa-se que para as duas areias secas o calor específico dos solos não variou em função do aumento do índice de vazios, sendo seu valor igual ao valor de c_s , o calor específico dos sólidos do solo ($0,215 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$), o que pode ser verificado através da equação (51), usada para a estimativa deste parâmetro.

Aumentando-se a umidade gravimétrica e o grau de saturação das duas areias, foram obtidas novas relações entre o calor específico e o índice de vazios e o calor específico e o grau de saturação. A Tabela 35 e a Tabela 36 apresentam os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de calor específico obtidos.

Tabela 35 - Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AMG não saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ^o C)
AMG (19%<S<40%)	01	8,06	39,26	0,54	1,71	1,09	0,274
	02	7,62	35,18	0,57	1,68	1,26	0,271
	03	7,37	34,18	0,57	1,68	1,23	0,269
	04	7,33	31,51	0,61	1,64	0,87	0,269
	05	7,47	30,56	0,65	1,61	1,12	0,270
	06	7,33	27,03	0,72	1,54	0,97	0,269
	07	7,16	24,21	0,78	1,48	1,03	0,267
	08	6,91	19,13	0,96	1,35	0,69	0,266
AMG (40%<S<80%)	01	11,58	79,16	0,39	1,91	1,94	0,296
	02	11,47	57,60	0,53	1,73	1,40	0,296
	03	11,35	46,51	0,65	1,61	1,30	0,295
	04	11,30	40,48	0,74	1,52	0,93	0,295

Tabela 36 - Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AU não saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ^o C)
AU (27%<S<45%)	01	17,55	44,34	1,05	1,29	1,10	0,3322
	02	17,45	43,00	1,07	1,28	1,28	0,3316
	03	17,55	40,81	1,14	1,24	0,95	0,3322
	04	16,47	33,55	1,30	1,15	0,94	0,3260
	05	15,79	27,73	1,51	1,06	0,82	0,3221
AU (40%<S<80%)	01	23,44	77,65	0,80	1,47	1,98	0,364
	02	23,13	64,71	0,95	1,36	1,57	0,362
	03	22,88	58,46	1,04	1,30	1,42	0,361
	04	22,06	54,64	1,07	1,28	1,20	0,357
	05	21,77	43,89	1,31	1,14	1,03	0,355

A Figura 47 apresenta as relações entre o calor específico e a variação do índice de vazios e entre calor específico e a variação do grau de saturação para as duas areias não saturadas, para as umidades médias de 7,41% (AMG) e 16,49% (AU).

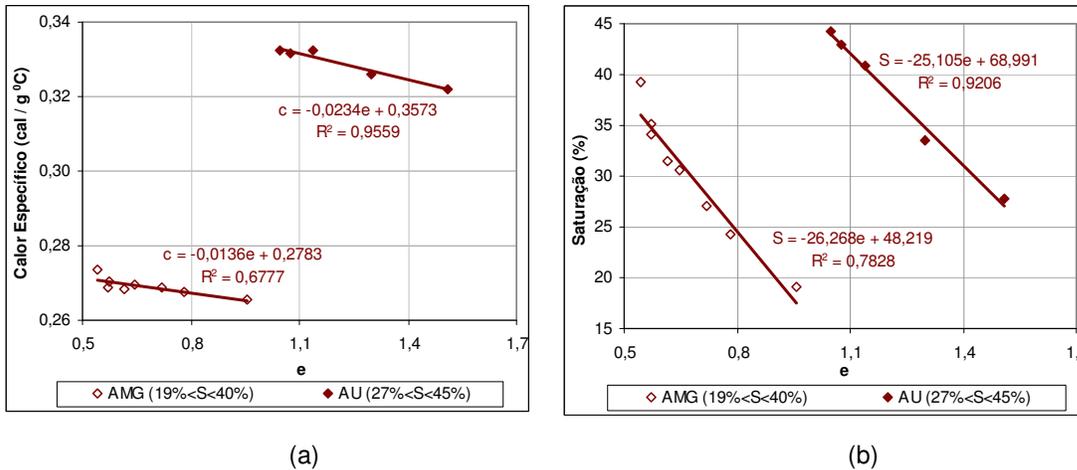


Figura 47 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a), índice de vazios x grau de saturação (b) – AMG (19%<S<40%) e AU (27%<S<45%) não saturadas.

Para as duas areias não saturadas, os valores de calor específico praticamente não variaram com a elevação do índice de vazios, como mostra a Figura 47(a); a variação média das duas areias foi de aproximadamente 3%. Pela definição de calor específico, quanto maior o índice de vazios, menor a massa específica do material e menor a energia necessária para poder variar a temperatura do solo, ou seja, menor o calor específico. Quanto maior o índice de vazios, mais ar no solo e menor o grau de saturação, Figura 47(b), o que também contribui para a redução do calor específico, pois, segundo Mitchell (1993), o ar tem um calor específico 4 vezes menor que o da água. A Figura 48 mostra que quanto maior o grau de saturação, maior o calor específico, entretanto, esta variação não foi significativa, aproximadamente 3%.

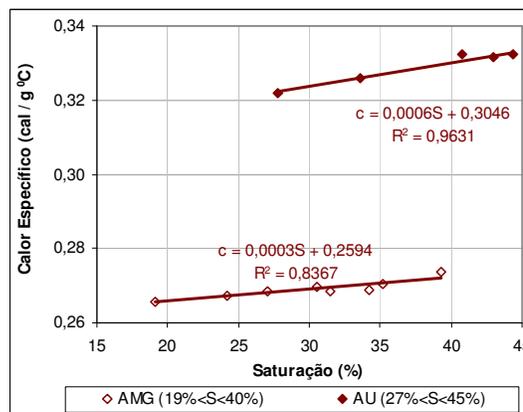


Figura 48 – Curvas de calor específico x grau de saturação – AMG (19%<S<40%) e AU (27%<S<45%) não saturadas.

A Figura 48 mostra ainda que, para um mesmo grau de saturação, mesmo possuindo maiores índices de vazios, a Areia Uniforme apresentou valores de calor específico mais elevados que a Areia Mal graduada, provavelmente devido à sua maior umidade gravimétrica. Passando da Areia Mal Graduada para a Areia Uniforme o aumento médio do calor específico foi de aproximadamente 22%.

Os resultados de calor específico para a Areia Mal Graduada (AMG) variaram de 0,266 a 0,274 cal/g⁰C para índices de vazios de 0,96 a 0,54 e umidade média de 7,41%. Já na Areia Uniforme (AU), os resultados variaram de 0,3221 a 0,3322 cal/g⁰C para índices de vazios de 1,51 a 1,05 e umidade média de 16,49%.

Observa-se que estes valores de calor específico foram um pouco maiores que os encontrados para as duas areias secas, com um aumento médio para as duas areias de 39%, ou seja, mais uma vez pode-se observar que quanto maior o teor de umidade, maior o calor específico dos solos.

Aumentando-se as umidades médias das duas areias para 11,43% (AMG) e 22,66% (AU), obtiveram-se novas relações entre o calor específico e a variação do índice de vazios para as duas areias não saturadas, com graus de saturação variando entre 40% e 80%.

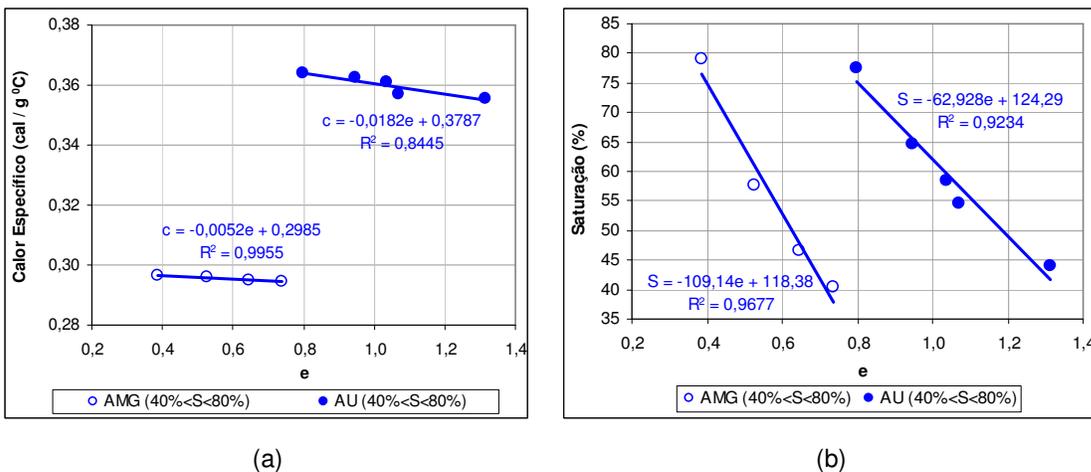


Figura 49 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a), índice de vazios x grau de saturação (b) – AMG e AU não saturadas (40%<S<80%).

Observa-se a partir das Figura 49 (a) e (b) que o comportamento apresentado pelas duas areias com umidades e graus de saturação mais elevados foi o mesmo apresentado anteriormente, ou seja, quanto maior o índice de vazios, menor o grau de saturação, Figura 49(b), e menor o calor específico

dos solos, Figura 49(a), entretanto, esta variação foi pouco significativa. A variação média do calor específico com o aumento do índice de vazios das duas areias foi de aproximadamente 1,5%.

Os resultados encontrados variaram de 0,295 a 0,296 cal/g⁰C para índices de vazios de 0,74 a 0,39 para a Areia Mal Graduada. Para a Areia Uniforme, os resultados variaram de 0,355 a 0,364 cal/g⁰C para índices de vazios de 1,31 a 0,80. Observa-se que esses resultados foram ligeiramente maiores que os anteriores para as duas areias não saturadas com umidades mais baixas, um aumento médio para as duas areias de 9,5%.

A influência do aumento do grau de saturação é apresentada na Figura 50 e percebe-se mais uma vez que esta influência para as duas areias é pouco significativa, sendo que a Areia Uniforme (AU) apresenta uma elevação dos valores um pouco mais acentuada do que a Areia Mal Graduada (AMG).

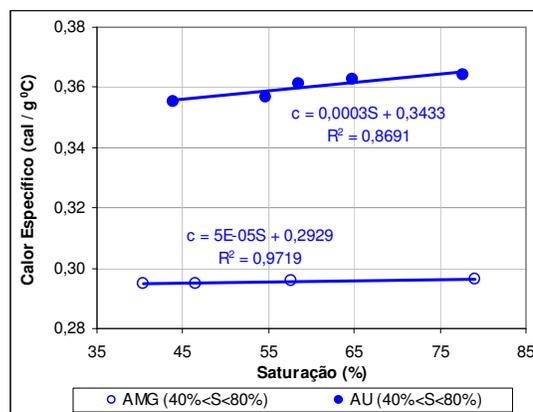


Figura 50 – Curva de calor específico x grau de saturação – AMG e AU não saturadas (40%<S<80%).

A Figura 50 mostra que, mais uma vez, para um mesmo grau de saturação, mesmo possuindo maiores índices de vazios, a Areia Uniforme apresentou valores de calor específico mais elevados que a Areia Mal graduada, provavelmente devido à sua maior umidade gravimétrica. Passando da Areia Mal Graduada para a Areia Uniforme o aumento médio do calor específico foi mais uma vez de 22%.

As areias quando saturadas apresentaram os resultados de calor específico apresentados na Tabela 37 e na Tabela 38. Os resultados de calor específico e umidade gravimétrica em função da variação do índice de vazios para saturação de 100% estão apresentados na Figura 51.

Tabela 37 – Dados de corpos de prova e resultados de calor específico – AMG saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
AMG (S=100%)	01	28,11	99,35	0,75	1,51	2,20	0,387
	02	27,22	98,66	0,75	1,51	2,48	0,383
	03	22,20	99,57	0,63	1,62	2,67	0,358
	04	20,38	99,75	0,59	1,67	2,38	0,348
	05	16,73	99,28	0,48	1,79	2,69	0,328

Tabela 38 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico – AU saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
AU (S=100%)	01	50,00	100,00	1,32	1,14	1,92	0,48
	02	47,00	99,34	1,25	1,18	1,89	0,47
	03	35,90	98,39	0,97	1,35	1,96	0,42
	04	35,23	99,45	0,97	1,34	2,03	0,42

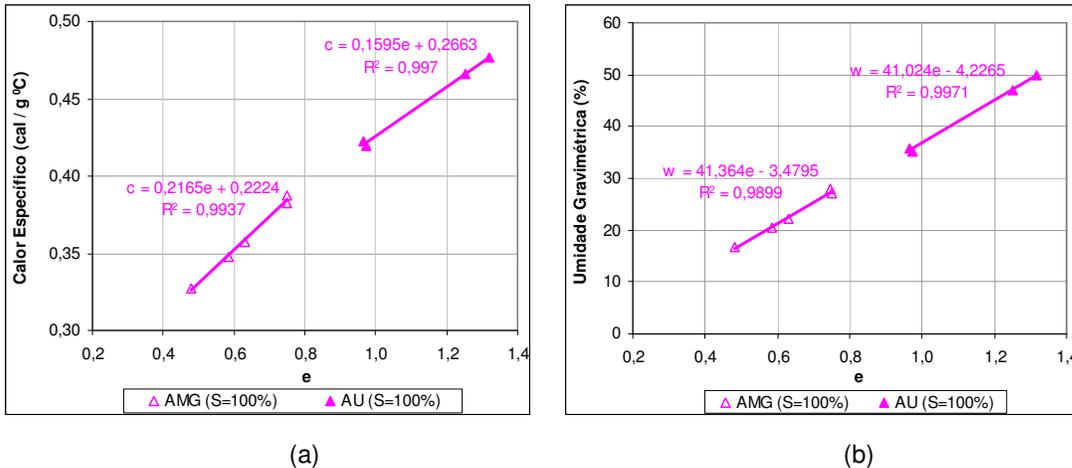


Figura 51 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a), índice de vazios x umidade gravimétrica (b) – AMG e AU saturadas.

Quando saturadas, as duas areias apresentaram uma variação mais significativo do calor específico com o aumento do índice de vazios, um aumento de aproximadamente 16%, Figura 51(a), o contrário do que foi observado para essas areias nos estados seco e não saturado. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento do teor de umidade com o aumento do índice de vazios, Figura 51(b), pois a água possui um valor de calor específico 5,6 vezes maior que o da média considerada por Farouki (1993) para os sólidos dos solos em geral (0,18 cal/g⁰C). A Figura 52 mostra a elevação do calor específico em função do aumento do teor de umidade.

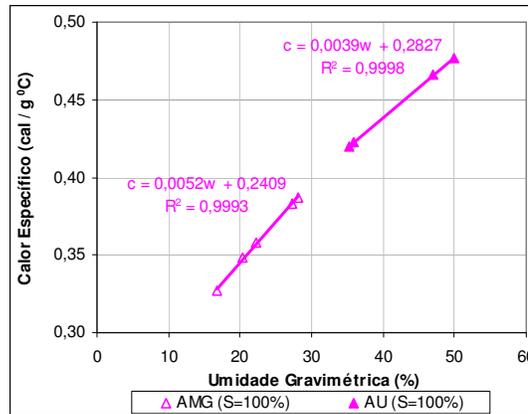


Figura 52 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – AMG e AU saturadas.

Os resultados de calor específico para as areias saturadas foram mais elevados que os apresentados anteriormente para as areias secas e não saturadas e variaram de 0,328 a 0,387 cal/g⁰C para a Areia Mal Graduada com índices de vazios variando de 0,48 a 0,75. Já a Areia Uniforme apresentou variação de 0,42 a 0,48 cal/g⁰C para índices de vazios de 0,97 a 1,32.

A Tabela 39 apresenta um resumo com os intervalos de valores de calor específico obtidos em função da variação do grau de saturação e do índice de vazios para as duas areias ensaiadas.

Tabela 39 – Intervalos de calor específico em função da variação do índice de vazios e do grau de saturação – AMG e AU.

AMG			AU		
S (%)	e	c (cal/g ⁰ C)	S (%)	e	c (cal/g ⁰ C)
0	0,66 - 0,37	0,215	0	1,18 - 0,77	0,215
19 - 40	0,96 - 0,54	0,266 - 0,274	27 - 45	1,51 - 1,05	0,3221 - 0,3322
40 - 80	0,74 - 0,39	0,295 - 0,296	40 - 80	1,31 - 0,80	0,355 - 0,364
100	0,75 - 0,48	0,387 - 0,328	100	1,32 - 0,97	0,48 - 0,42

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 39 pôde-se observar que os valores obtidos de calor específico para as areias estão próximos da faixa de valores apresentados na literatura consultada. Abu-Hamdeh (2003), encontrou para uma areia valores que variaram de 0,19 a 0,40 cal/g⁰C para umidades gravimétricas de 0 a 25% e densidade seca de 1,3 g/cm³. Mitchell (1993) apresenta como valor médio de solos um valor mais baixo de calor específico, 0,175 cal/g⁰C, entretanto ele não relaciona este valor com estado de saturação, teor de umidade ou densidade dos solos.

A Figura 53 apresenta um gráfico reunindo todas as relações de calor específico em função da variação do índice de vazios já apresentadas para as duas areias e mostra a influência bastante significativa da variação do teor de umidade e do grau de saturação das areias nos resultados de calor específico destes solos, ao contrário da variação do índice de vazios, que não altera significativamente esses resultados.

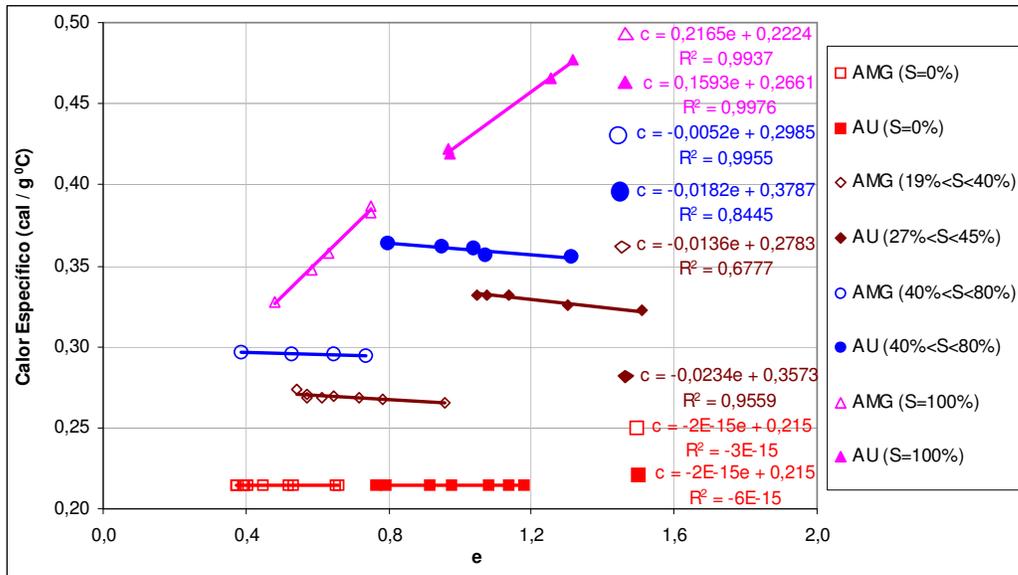


Figura 53 – Curvas de calor específico x índice de vazios – AMG e AU em diferentes graus de saturação e umidades gravimétricas.

Em geral, a Areia Uniforme (AU) não saturada e saturada, mesmo apresentando maiores índices de vazios, forneceu resultados de calor específico mais elevados do que a Areia Mal Graduada (AMG) para as mesmas faixas de saturação, provavelmente devido aos maiores teores de umidade apresentados pela mesma.

A Figura 54 apresenta melhor a relação entre o calor específico e o teor de umidade gravimétrica para as duas areias de secas a saturadas e propõe uma correlação que depende apenas do teor de umidade gravimétrica para determinar o calor específico desse tipo de solo (areias quartzosas).

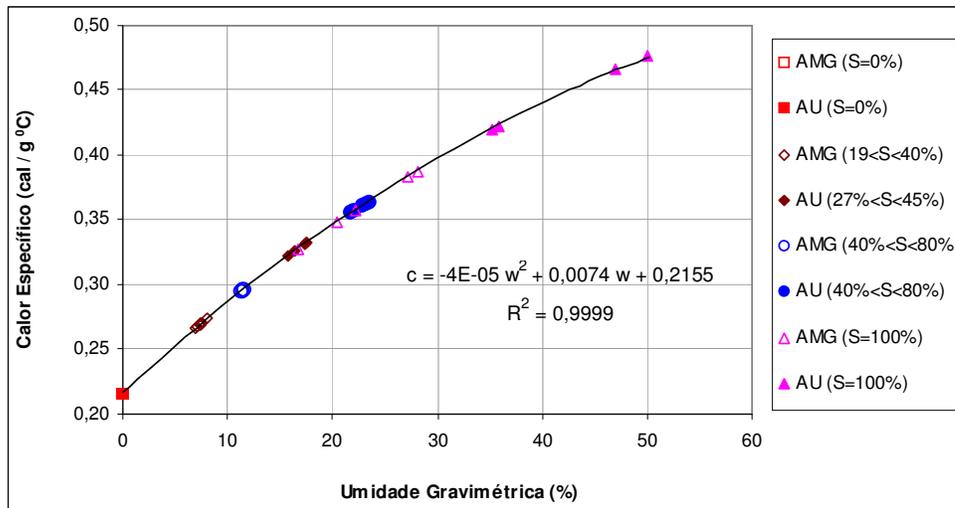


Figura 54 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – AMG e AU de secas a saturadas.

A Figura 55(a) e a Figura 55(b) apresentam para as duas areias estudadas as relações entre o calor específico e o teor de umidade gravimétrica para um mesmo índice de vazios, comparando com outros índices de vazios. Os dados utilizados para a confecção destes gráficos estão agrupados e listados na Tabela 40 e na Tabela 41, para a Areia Mal Graduada e para a Areia Uniforme, respectivamente.

Tabela 40 – Variação do calor específico em função da variação do teor de umidade para um mesmo índice de vazios e para índices de vazios diferentes – AMG.

CP	e	w (%)	c (cal/g°C)
01	0,39	0,00	0,22
02	0,39	11,58	0,296
01	0,45	0,00	0,215
02	0,48	16,73	0,328
01	0,54	0,00	0,215
02	0,54	8,06	0,274
03	0,53	11,47	0,296
04	0,59	20,38	0,348
01	0,65	0,00	0,215
02	0,65	7,47	0,270
03	0,65	11,35	0,295
04	0,63	22,20	0,358

Tabela 41 – Variação do calor específico em função da variação do teor de umidade para um mesmo índice de vazios e para índices de vazios diferentes – AU.

CP	e	w(%)	c (cal/g°C)
01	0,79	0,00	0,215
02	0,80	23,44	0,364
01	0,98	0,00	0,215
02	0,95	23,13	0,362
03	0,97	35,23	0,420
01	1,08	0,00	0,215
02	1,05	17,55	0,332
03	1,04	22,88	0,361
01	1,13	0,00	0,215
02	1,14	17,55	0,332
01	1,30	16,47	0,326
02	1,31	21,77	0,355
03	1,32	50,00	0,477

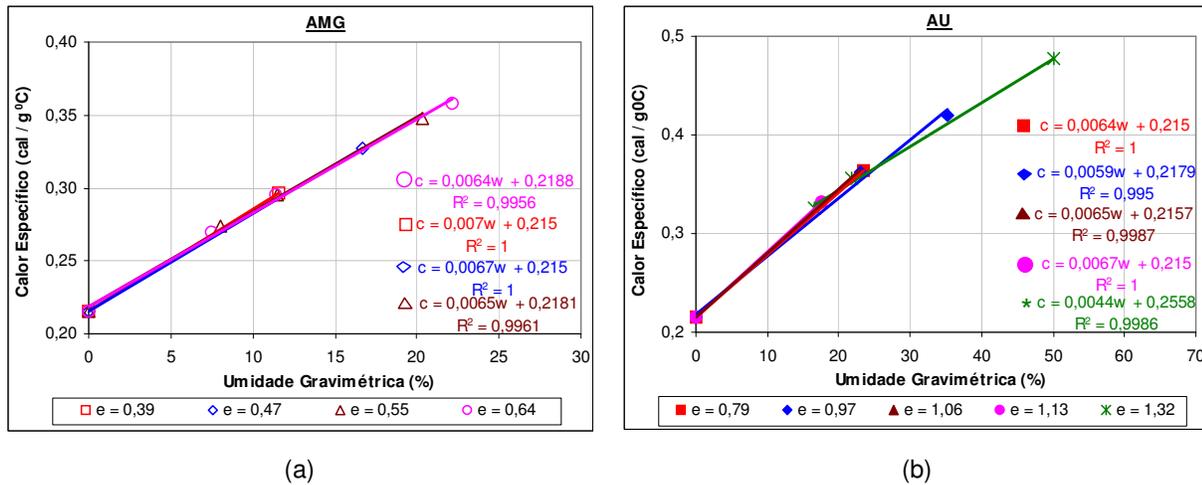


Figura 55 – Curvas de calor específico x umidade gravimétrica – AMG e AU para diferentes índices de vazios.

As figuras acima estão indicando que quanto maior o teor de umidade, para um mesmo índice de vazios, maior o calor específico da Areia Mal Graduada e da Areia Uniforme, respectivamente, o que já foi visto anteriormente.

A Figura 55 mostra ainda que a influência da variação do teor de umidade nos valores de calor específico das duas areias é muito mais significativa que a influência da variação do índice de vazios, como já havia sido verificado. Para um mesmo índice de vazios, o calor específico aumenta significativamente com o aumento da quantidade de água nos solos, e, para uma mesma umidade gravimétrica, o calor específico praticamente não varia para diferentes índices de vazios. Tal fato pode ser explicado da seguinte forma: para um mesmo teor de

umidade, quando se aumenta o índice de vazios das areias, sua capacidade de conduzir calor diminui tendendo a aumentar a retenção de calor no mesmo, ou seja, aumentar o calor específico. Por outro lado, quando se aumenta o índice de vazios das areias, diminui-se a sua massa específica, o que, pela definição de calor específico, diminuiria também o calor específico das mesmas. Esses efeitos contrários nos resultados de calor específico fazem com que seus valores se mantenham praticamente constantes com a variação do índice de vazios.

5.2.2. Solos C100 e C80

Os corpos de prova do solo C100 utilizados nos ensaios de condutividade térmica também foram utilizados para estimar o calor específico. Trabalhou-se com os solos inicialmente saturados, variando-se o índice de vazios e a umidade gravimétrica a partir da secagem ao ar dos corpos de prova.

A Tabela 42 traz os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de calor específico obtidos para cada um deles. O valor de c_s utilizado para os cálculos foi 0,263 cal/g⁰C, sugerido para argilas por Bristow (1998). A Figura 56 apresenta os gráficos que relacionam o calor específico com o índice de vazios e a umidade gravimétrica do solo C100.

Tabela 42 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – C100.

CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ (W/mK)	c (cal/g ⁰ C)
01	55,65	99,65	1,47	1,07	1,29	0,53
02	45,40	98,11	1,22	1,19	1,31	0,49
03	45,29	95,29	1,25	1,17	1,15	0,49
04	41,77	100,00	1,08	1,27	1,31	0,48
05	26,70	74,77	0,94	1,36	1,07	0,42
06	12,98	34,74	0,99	1,33	0,95	0,35
07	11,38	29,85	1,01	1,31	-	0,34
08	5,86	15,43	1,00	1,32	-	0,30

Observa-se a partir da Figura 56(a) que o calor específico do solo C100 tendeu a aumentar com o aumento do índice de vazios. Segundo a definição de calor específico (cal/g⁰C), energia necessária para fazer variar de um grau Celsius (1⁰C) a temperatura de um grama (1g) de solo, estes resultados não estariam coerentes, visto que com o aumento do índice de vazios e conseqüente diminuição da massa específica do material, faria-se necessário uma menor energia para variação da temperatura do mesmo. Entretanto, este

comportamento pode ser explicado pelo aumento do teor de umidade com o aumento do índice de vazios, Figura 56(b), pois a água possui um valor de calor específico 4 vezes maior que a do ar. A Figura 57 mostra a elevação do calor específico em função do aumento do teor de umidade.

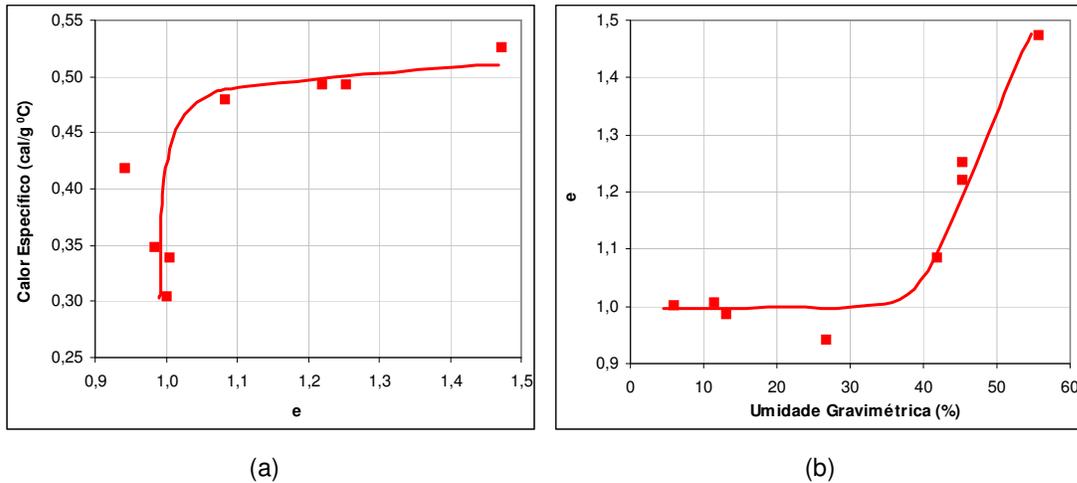


Figura 56 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a) e calor específico x umidade gravimétrica (b) – C100.

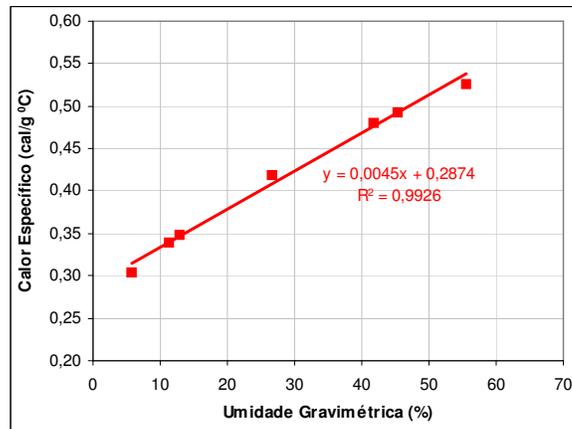


Figura 57 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – C100.

Observa-se que o calor específico neste solo se apresentou mais sensível à variação de umidade do que à variação do índice de vazios, pois um aumento do índice de vazios a umidades constantes causaria uma redução no calor específico, devido à redução de sua massa específica. Entretanto, índices de vazios elevados estão associados a umidades altas, explicando assim o maior valor de calor específico.

Os resultados obtidos variaram de 0,30 a 0,530 cal/g⁰C com índices de vazios de 1,00 a 1,47, massa específica seca de 1,32 a 1,07 g/cm³ e umidades de 5,86 a 55,65%. Estes resultados estão de acordo com os encontrados na literatura consultada. Abu-Hamdeh (2003) encontrou para uma argila calor específico variando de 0,28 a 0,53 cal/g⁰C, para massa específica seca de 1,3 g/cm³ e umidade variando de 0 a 25%.

O solo C100 foi ensaiado seco em forma de pó (umidade higroscópica) e na condição de lama (saturado). Os dados dos corpos de prova e os resultados encontrados de calor específico estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 – Calor específico do solo C100 na umidade higroscópica e saturado.

	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
Umidade Higroscópica (pó)	1,91	1,70	2,97	0,66	0,07	0,277
Saturado (LL)	73,16	99,91	1,93	0,90	0,97	0,574

Os corpos de prova do solo C80 utilizados nos ensaios de condutividade térmica também foram utilizados para estimar o calor específico dos solos. Trabalhou-se com os solos inicialmente saturados, variando-se o índice de vazios e a umidade gravimétrica a partir da secagem ao ar dos corpos de prova. A Tabela 44 traz os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de calor específico obtidos para cada um deles. O valor de c_s utilizado para os cálculos foi 0,263 cal/g⁰C, sugerido para argilas por Bristow (1998). A Figura 58 apresenta os gráficos que relacionam o calor específico com o índice de vazios e a umidade gravimétrica do solo C80.

Tabela 44 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – C80.

CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d (g/cm ³)	λ (W/mK)	c (cal/g ⁰ C)
01	64,54	100,00	1,72	0,98	1,11	0,55
02	57,54	99,21	1,48	1,07	1,16	0,53
03	53,90	97,45	1,54	1,05	1,16	0,52
04	36,91	95,38	1,03	1,31	1,43	0,46
05	28,02	87,50	0,85	1,44	1,52	0,42
06	20,84	76,58	0,72	1,54	-	0,39

Observa-se a partir da Figura 58(a) que o calor específico do solo C80 apresentou o mesmo comportamento apresentado pelo solo C100, ou seja, tendeu a aumentar com o aumento do índice de vazios. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento do teor de umidade com o aumento do índice

de vazios, Figura 58(b). A Figura 59 mostra a elevação do calor específico em função do aumento do teor de umidade.

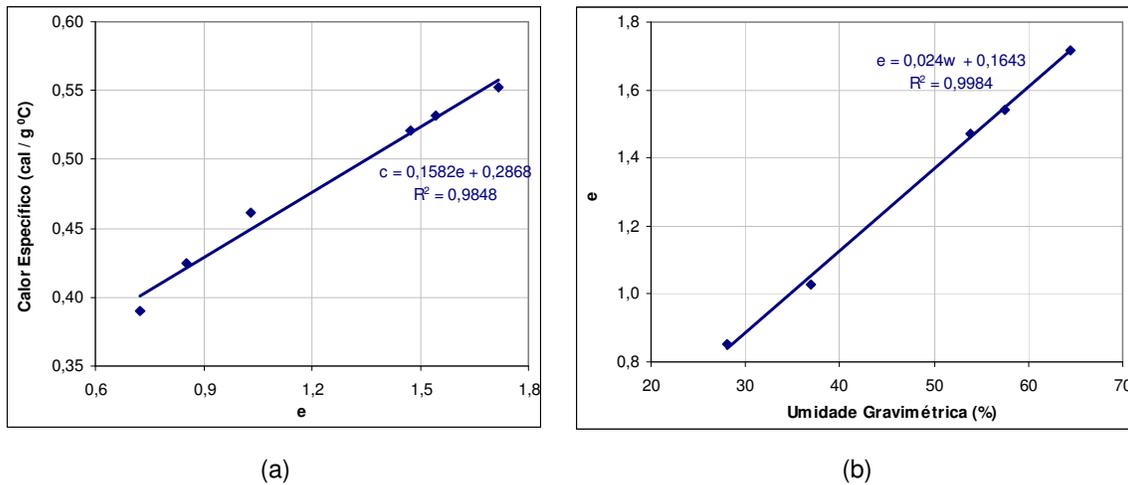


Figura 58 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a) e índice de vazios x umidade gravimétrica (b)– C80.

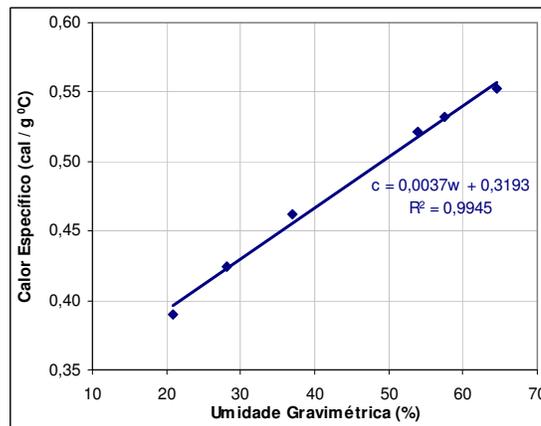


Figura 59 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – C80.

Observa-se que o calor específico neste solo também se apresentou mais sensível à variação de umidade do que à variação do índice de vazios, pois um aumento do índice de vazios a umidades constantes causaria uma redução no calor específico do solo C80, devido à redução de sua massa específica. Entretanto, índices de vazios elevados estão associados a umidades altas, por isso, maior o calor específico.

Os resultados obtidos variaram de 0,39 a 0,55 cal/g°C com índices de vazios de 0,72 a 1,72, massa específica seca de 1,54 a 0,98 g/cm³ e umidades de 20,84 a 64,54%. Estes resultados estão de acordo com os encontrados na

literatura consultada. Como já foi dito, Abu-Hamdeh (2003) encontrou para uma argila calor específico variando de 0,28 a 0,53 cal/g⁰C, para massa específica seca de 1,3 g/cm³ e umidade variando de 0 a 25%.

A bentonita também foi ensaiada seca em forma de pó (umidade higroscópica) e na condição de lama (saturada). Os dados dos corpos de prova e os resultados encontrados de calor específico obtidos estão apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 – Calor específico da Bentonita na umidade higroscópica e saturada.

	W (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
Umidade Higroscópica (pó)	14,03	10,59	3,82	0,60	0,06	0,354
Saturada (LL)	425,39	99,36	12,35	0,22	0,63	0,860

Para os solos CB40 e CB60, apenas os corpos de prova saturados apresentaram resultados confiáveis. A Tabela 46 traz os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de calor específico obtidos para cada um deles.

Tabela 46 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico – CB40 e CB60 saturados.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)
CB40	01	57,73	100,00	1,56	1,06	1,20	0,533
CB60	01	57,06	100,00	1,56	1,07	1,14	0,531

A Tabela 46 mostra que os corpos de prova dos dois solos saturados apresentaram praticamente o mesmo valor de calor específico, independente da mineralogia. O solo mais argiloso, teoricamente deveria exigir maior energia para fazer varia a sua temperatura, pois apresenta normalmente maior massa específica, ou seja, mais massa por unidade de volume. Entretanto, observa-se que neste caso, todos os índices físicos são praticamente iguais, e a influência da mineralogia no valor de calor específico não se verifica.

Os solos C60, C40 e CB80 não foram ensaiados devido a limitações na altura das prensas de adensamento para compactação estática e nas dimensões dos moldes de compactação para a confecção dos corpos de prova, conforme já discutido anteriormente.

5.2.3. Calor Específico dos Sólidos

Para estimar o calor específico dos sólidos dos solos (c_s) utilizou-se a seguinte formulação revisada de Duarte (2004), conforme discutido no Capítulo 2:

$$c_s = \left(\frac{\lambda}{D \cdot \rho_s} \right) \cdot (e + 1) - w$$

onde:

c_s – calor específico dos sólidos (cal/g⁰C)

λ – condutividade térmica do solo (W/mK)

D – difusividade térmica do solo (m²/s)

ρ_s – massa dos sólidos do solo (g/cm³)

e – índice de vazios

w – umidade gravimétrica do solo

A sonda térmica fornece os valores de condutividade e difusividade térmica e, para o índice de vazios e a umidade gravimétrica correspondentes calcula-se o calor específico dos sólidos dos solos. Os mesmos corpos de prova utilizados nos ensaios de condutividade térmica e no cálculo do calor específico foram utilizados para estimar o calor específico dos sólidos dos solos.

5.2.3.1. Areia Mal Graduada e Areia Uniforme

Os dados dos corpos de prova ensaiados e os resultados de calor específico dos sólidos das duas areias estão listados na Tabela 47 e na Tabela 48. Da Figura 60 a Figura 63 são apresentados os gráficos que relacionam o calor específico dos sólidos com o índice de vazios, o grau de saturação e o teor de umidade das duas areias de secas a saturadas.

Tabela 47 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – AMG de seca a saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)	D (mm ² /s)	c_s (cal/g ⁰ C)
AMG (S=0%)	01	0,00	0,00	0,37	1,93	0,250	0,215	0,130	0,239
	02	0,00	0,00	0,37	1,92	0,260	0,215	0,117	0,277
	03	0,00	0,00	0,39	1,90	0,283	0,215	0,123	0,288
	04	0,00	0,00	0,40	1,89	0,260	0,215	0,117	0,281
	05	0,00	0,00	0,41	1,88	0,250	0,215	0,110	0,289
	06	0,00	0,00	0,45	1,82	0,273	0,215	0,120	0,298
	07	0,00	0,00	0,52	1,74	0,240	0,215	0,110	0,299
	08	0,00	0,00	0,54	1,72	0,220	0,215	0,110	0,277
	09	0,00	0,00	0,65	1,60	0,180	0,215	0,100	0,268
	10	0,00	0,00	0,66	1,59	0,200	0,215	0,100	0,300
AMG (19%<S<40%)	01	8,06	39,26	0,54	1,71	1,09	0,274	0,667	0,209
	02	7,62	35,18	0,57	1,68	1,26	0,271	0,707	0,235
	03	7,37	34,18	0,57	1,68	1,23	0,269	0,605	0,272
	04	7,33	31,51	0,61	1,64	0,87	0,269	0,363	0,332
	05	7,47	30,56	0,65	1,61	1,12	0,270	0,437	0,364
	06	7,33	27,03	0,72	1,54	0,97	0,269	0,660	0,211
	07	7,16	24,21	0,78	1,48	1,03	0,267	0,730	0,209
	08	6,91	19,13	0,96	1,35	0,69	0,266	0,275	0,424
AMG (40%<S<80%)	01	11,58	79,16	0,39	1,91	1,94	0,296	0,753	0,295
	02	11,47	57,60	0,53	1,73	1,40	0,296	0,730	0,236
	03	11,35	46,51	0,65	1,61	1,30	0,295	0,493	0,366
	04	11,30	40,48	0,74	1,52	0,93	0,295	0,290	0,474
AMG (S=100%)	01	28,11	99,35	0,75	1,51	2,20	0,387	0,847	0,342
	02	27,22	98,66	0,75	1,51	2,48	0,383	0,768	0,446
	03	22,20	99,57	0,63	1,62	2,67	0,358	0,793	0,443
	04	20,38	99,75	0,59	1,67	2,38	0,348	0,440	0,349
	05	16,73	99,28	0,48	1,79	2,69	0,328	0,855	0,421

Tabela 48 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – AU de seca a saturada.

	CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ W/mK	c (cal/g ⁰ C)	D (mm ² /s)	c_s (cal/g ⁰ C)
AU (S=0%)	01	0,00	0,00	0,77	1,50	0,180	0,215	0,100	0,287
	02	0,00	0,00	0,79	1,48	0,183	0,215	0,100	0,297
	03	0,00	0,00	0,92	1,38	0,177	0,215	0,100	0,305
	04	0,00	0,00	0,98	1,34	0,177	0,215	0,100	0,315
	05	0,00	0,00	1,08	1,27	0,170	0,215	0,100	0,319
	06	0,00	0,00	1,13	1,24	0,140	0,215	0,090	0,300
	07	0,00	0,00	1,18	1,22	0,150	0,215	0,090	0,327
AU (27%<S<45%)	01	17,55	44,34	1,05	1,29	1,10	0,3322	0,463	0,397
	02	17,45	43,00	1,07	1,28	1,28	0,3316	0,540	0,401
	03	17,55	40,81	1,14	1,24	0,95	0,3322	0,383	0,437
	04	16,47	33,55	1,30	1,15	0,94	0,3260	0,325	0,559
	05	15,79	27,73	1,51	1,06	0,82	0,3221	0,320	0,542
AU (40%<S<80%)	01	23,44	77,65	0,80	1,47	1,98	0,364	0,680	0,416
	02	23,13	64,71	0,95	1,36	1,57	0,362	0,383	0,663
	03	22,88	58,46	1,04	1,30	1,42	0,361	0,293	0,832
	04	22,06	54,64	1,07	1,28	1,20	0,357	0,303	0,685
	05	21,77	43,89	1,31	1,14	1,03	0,355	0,247	0,822
AU (S=100%)	01	50,00	100,00	1,32	1,14	1,92	0,48	0,667	0,48
	02	47,00	99,34	1,25	1,18	1,89	0,47	0,487	0,68
	03	35,90	98,39	0,97	1,35	1,96	0,42	0,533	0,56
	04	35,23	99,45	0,97	1,34	2,03	0,42	0,810	0,36

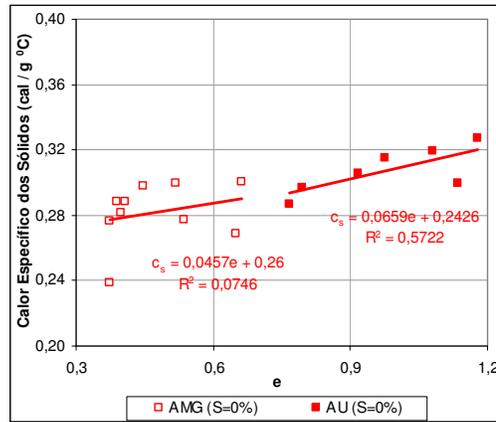


Figura 60 – Calor específico dos sólidos dos solos x índice de vazios – AMG e AU secas.

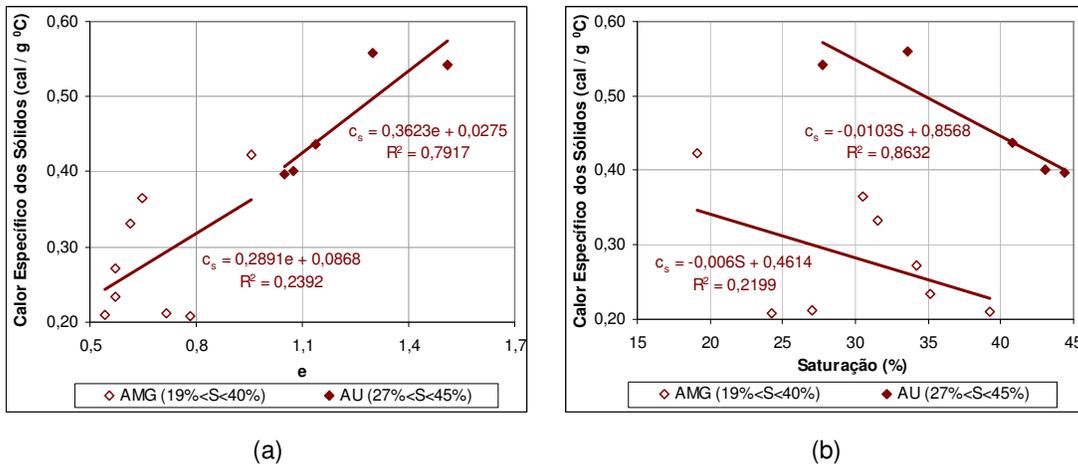


Figura 61 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x grau de saturação (b) – AMG (19%<S<40%) e AU (27%<S<45%) não saturadas.

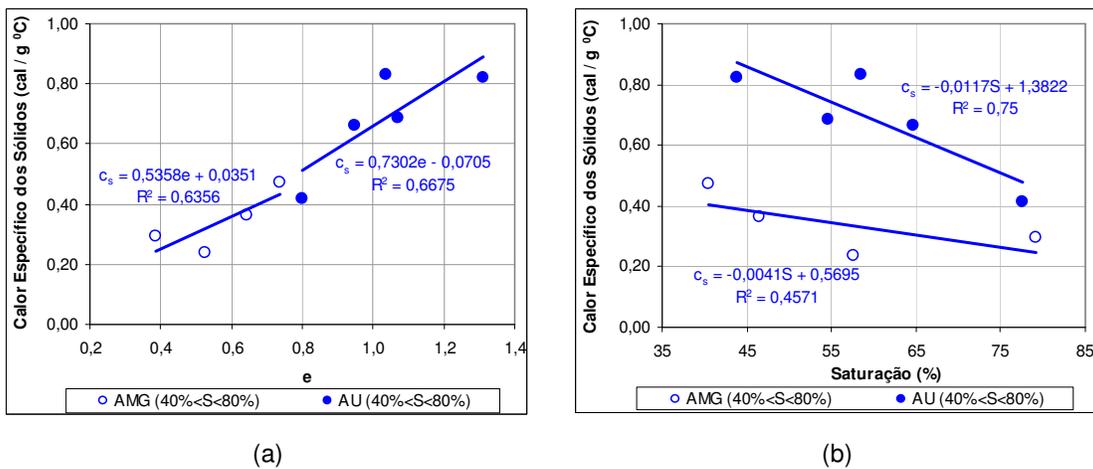


Figura 62 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x grau de saturação (b) – AMG e AU não saturadas (40%<S<80%).

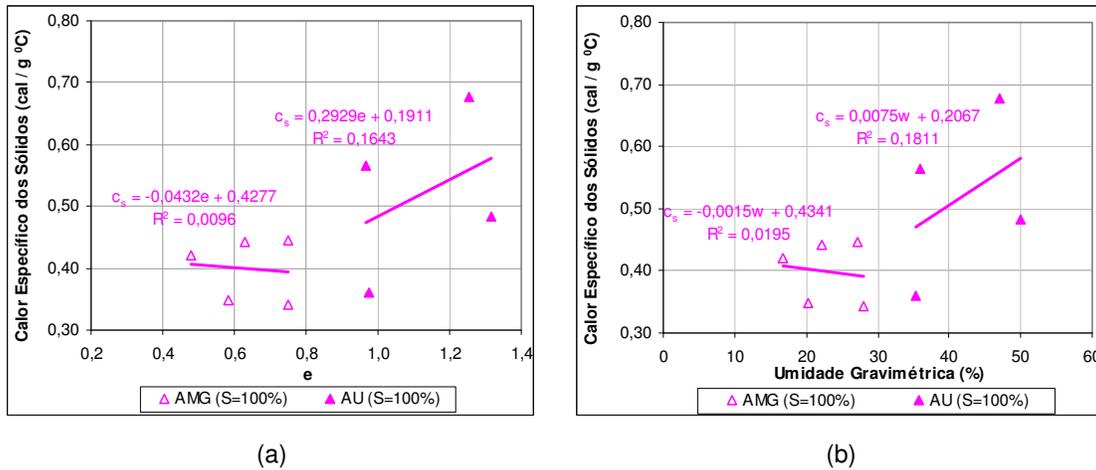


Figura 63 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x grau de saturação (b) – AMG e AU saturadas.

A Tabela 49 apresenta um resumo com os intervalos de valores de calor específico dos sólidos obtidos em função da variação do grau de saturação e do índice de vazios para as duas areias ensaiadas secas e não saturadas.

Tabela 49 – Intervalos de calor específico dos sólidos em função da variação do índice de vazios e do grau de saturação – AMG e AU.

AMG			AU		
S (%)	e	c_s (cal/g°C)	S (%)	e	c_s (cal/g°C)
0	0,66 - 0,37	0,30 - 0,239	0	1,18 - 0,77	0,327 - 0,287
19 - 40	0,96 - 0,54	0,424 - 0,209	27 - 45	1,51 - 1,05	0,542 - 0,397
40 - 80	0,74 - 0,39	0,474 - 0,295	40 - 80	1,31 - 0,80	0,822 - 0,416

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 49 pôde-se observar que os valores estimados de calor específico dos sólidos para as areias foram mais elevados que os valores apresentados na literatura consultada. Bristow (1998) sugere para areias um valor de 0,215 cal/g°C. Farouki (1986) apresenta um valor para os sólidos dos solos de 0,18 cal/g°C. Duarte (2004) encontrou calor específico dos sólidos para temperatura de aproximadamente 40°C de 0,188 cal/g°C para um solo areno-argiloso.

Observa-se que o calor específico dos sólidos variou com o aumento do índice de vazios e da quantidade de água presente nas duas areias ensaiadas, sendo a variação com o teor de umidade também observado por Duarte (2004). Os resultados deveriam apresentar um valor único para este parâmetro, visto

que a formulação utilizada estima o calor específico dos sólidos do solo (c_s), separando as parcelas de contribuição da água e do ar.

Pode-se observar ainda que os valores de calor específico dos sólidos (c_s) estimados foram maiores que os valores de calor específico dos solos (c), o que não está coerente, visto que este último leva em consideração a parcela dos sólidos, da água e do ar.

A Figura 63 apresenta para as duas areias saturadas resultados de calor específico dos sólidos muito dispersos, o que pode também ser explicado pela utilização dos valores de condutividade térmica próximos e acima do limite da sonda (2,0 W/mK) para o seu cálculo.

De acordo com os resultados de calor específico dos sólidos (c_s) apresentados, é possível que a formulação proposta e revisada de Duarte (2004) não se aplique para a determinação do c_s dos solos.

Uma provável fonte de erro poderia ser também as medidas de difusividade térmica (D) realizadas pela sonda e utilizadas no cálculo de c_s . A sonda fornece os resultados de difusividade do solo em apenas 1min, a partir de uma aproximação de medidas internas da própria sonda. Os registros internos de variação de temperatura x tempo para medir condutividade, resistividade e difusividade térmicas são da própria sonda, o que define por aproximação o comportamento térmico do solo que a envolve. Entretanto, é possível que medidas de variação de temperatura x tempo realizadas no próprio solo forneçam resultados mais confiáveis sobre a capacidade do solo de sofrer variações rápidas e significativas de temperatura, que é a difusividade térmica.

Duarte (2004) determinou o calor específico dos sólidos dos solos segundo Mitchell e Kao (1978), utilizando moldes de compactação de latão, placas isolantes de ACETAL e submetendo os corpos de prova ensaiados a condições de contorno específicas em banho-maria. Desta forma a autora determinava a difusividade térmica através do monitoramento da variação de temperatura ao longo do tempo e posteriormente calculava o calor específico dos sólidos. A sonda utilizada no presente trabalho já fornecia o valor de difusividade térmica, de tal forma que não foi preciso adotar a mesma metodologia que a autora citada. O ideal seria determinar a difusividade térmica destes solos utilizando a mesma metodologia aplicada por Duarte (2004) e comparar os resultados com os obtidos através da sonda.

Da Figura 64 à Figura 67 são apresentados os gráficos que relacionam difusividade térmica com o índice de vazios, o grau de saturação e o teor de umidade das duas areias de secas a saturadas.

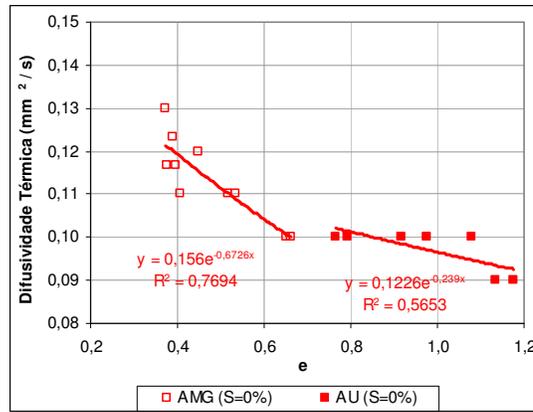
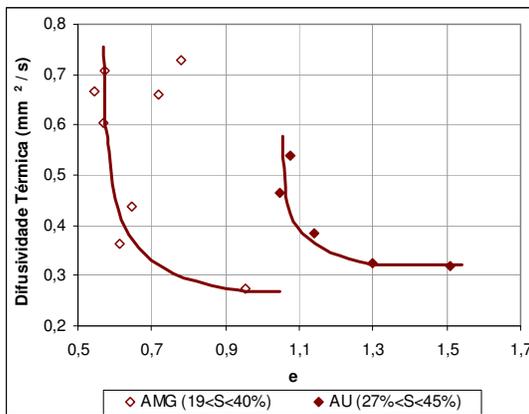
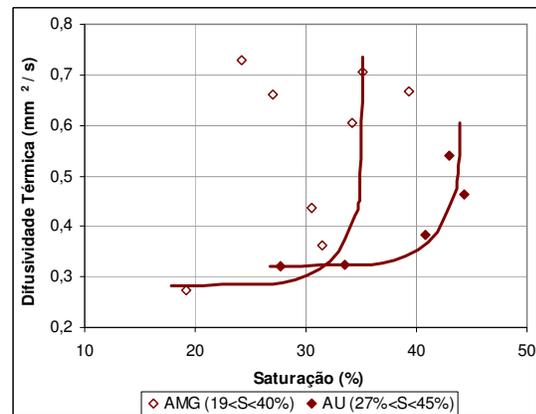


Figura 64 – Difusividade Térmica x índice de vazios – AMG e AU secas.

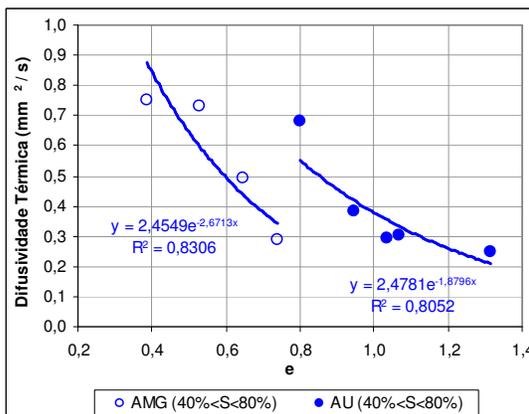


(a)

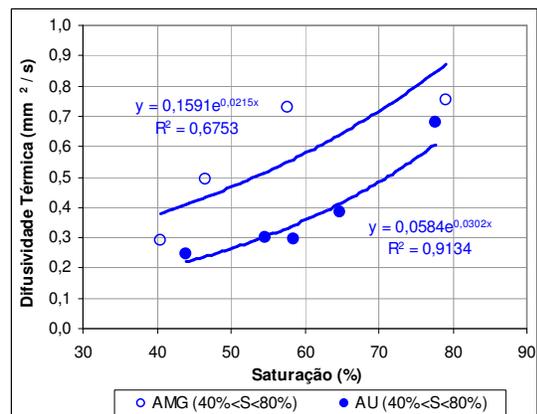


(b)

Figura 65 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x grau de saturação (b) – AMG (19% < S < 40%) e AU (27% < S < 45%) não saturadas.



(a)



(b)

Figura 66 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x grau de saturação (b) – AMG e AU não saturadas (40% < S < 80%).

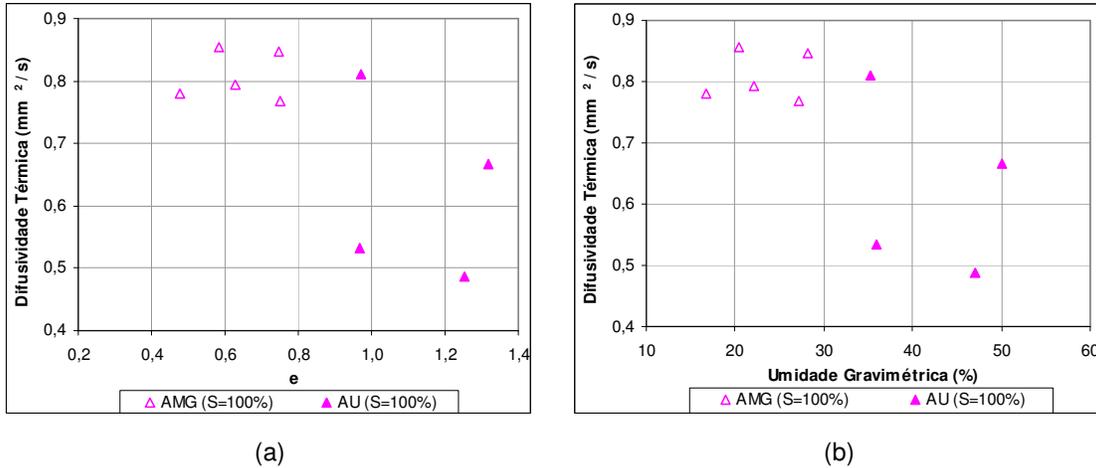


Figura 67 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x grau de saturação (b) – AMG e AU saturadas.

A difusividade térmica, que por definição é diretamente proporcional a condutividade térmica e inversamente proporcional ao calor específico, assim como a condutividade, em geral tendeu a diminuir com o aumento do índice de vazios e a aumentar com a elevação da quantidade de água presente nas areias.

As Figura 68(a) e (b) apresentam para as duas areias estudadas as relações entre a difusividade térmica e o teor de umidade gravimétrica para um mesmo índice de vazios, comparando com outros índices de vazios.

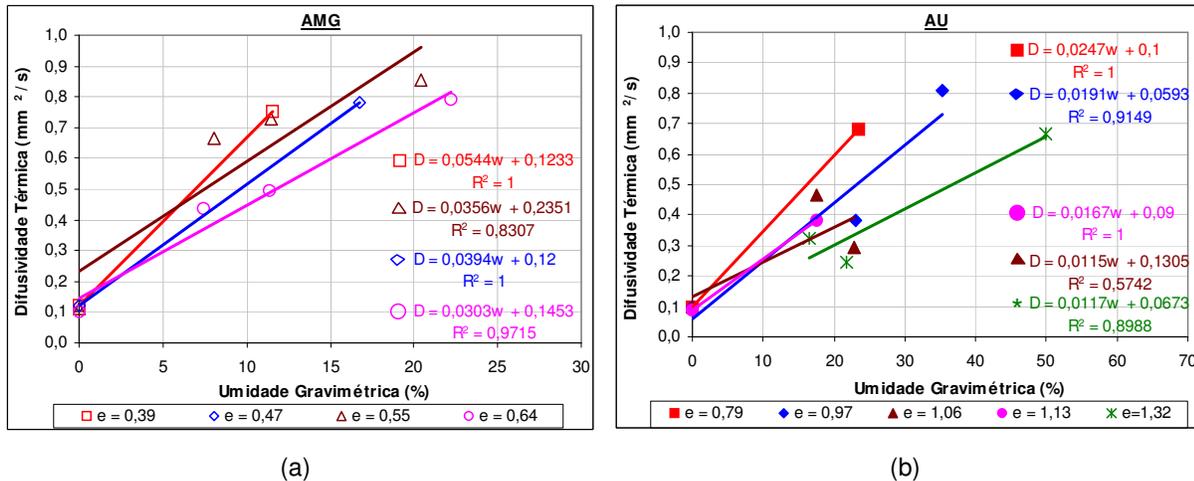


Figura 68 – Difusividade térmica x umidade gravimétrica – AMG e AU para diferentes índices de vazios.

A Figura 68(a) e (b) estão indicando que quanto maior o teor de umidade, para um mesmo índice de vazios, maior a difusividade térmica da Areia Mal Graduada e da Areia Uniforme, respectivamente, o que foi visto anteriormente.

A Figura 68 mostra ainda que a influência da variação do teor de umidade nos valores de difusividade térmica das duas areias é mais significativa que a influência da variação do índice de vazios. Para um mesmo índice de vazios, a difusividade térmica aumenta significativamente com o aumento da quantidade de água nos solos, e, para uma mesma umidade gravimétrica, a difusividade varia pouco para diferentes índices de vazios.

Pôde-se observar que os resultados de difusividade térmica obtidos não estão de acordo com os encontrados na literatura consultada. Krishnaiah e Singh (2003) citam alguns valores de difusividade térmica para areia seca e areia grossa úmida, 0,26 e 0,45 mm²/s, respectivamente. Abu-Hamdeh (2003) apresenta resultados aproximados de 0,2 e 0,55 mm²/s para uma areia seca e com 25% de umidade respectivamente. Duarte (2004) encontrou difusividade térmica para temperatura de aproximadamente 40°C de 0,33 mm²/s, para um solo areno-argiloso com teor de umidade de 7,7%. A Figura 67 apresenta para as duas areias saturadas resultados de difusividade térmica muito dispersos, o que também aconteceu com os resultados de condutividade térmica.

5.2.3.2. Solos C100 e C80

O calor específico dos sólidos para os solos C100 e C80 também foi estimado e os resultados encontrados apresentaram o mesmo comportamento apresentado pelas areias, ou seja, variação deste parâmetro com o índice de vazios e com o teor de umidade. Além disso, os valores estimados também foram mais elevados que os valores de calor específico (c), o que não está coerente, e mais elevados que os encontrados na literatura consultada.

A Tabela 50 e a Tabela 51 apresentam os dados dos corpos de prova e os resultados de calor específicos dos sólidos obtidos para os solos C100 e C80.

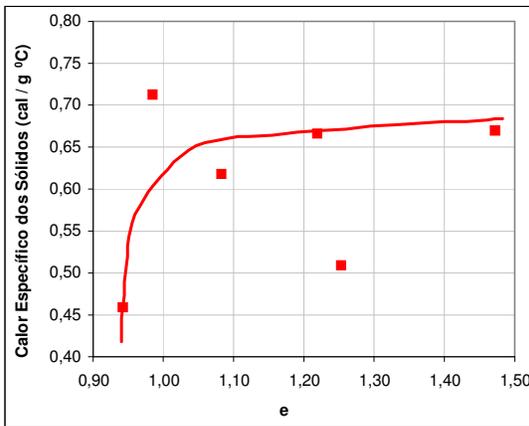
Tabela 50 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – C100.

CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d g/cm ³	λ (W/mK)	c (cal/g°C)	D (mm ² /s)	c_s (cal/g°C)
01	55,65	99,65	1,47	1,07	1,29	0,53	0,360	0,670
02	45,40	98,11	1,22	1,19	1,31	0,49	0,340	0,666
03	45,29	95,29	1,25	1,17	1,15	0,49	0,380	0,510
04	41,77	100,00	1,08	1,27	1,31	0,48	0,340	0,618
05	26,70	74,77	0,94	1,36	1,07	0,42	0,360	0,459
06	12,98	34,74	0,99	1,33	0,95	0,35	0,230	0,712
07	11,38	29,85	1,01	1,31	-	0,34	-	-
08	5,86	15,43	1,00	1,32	-	0,30	-	-

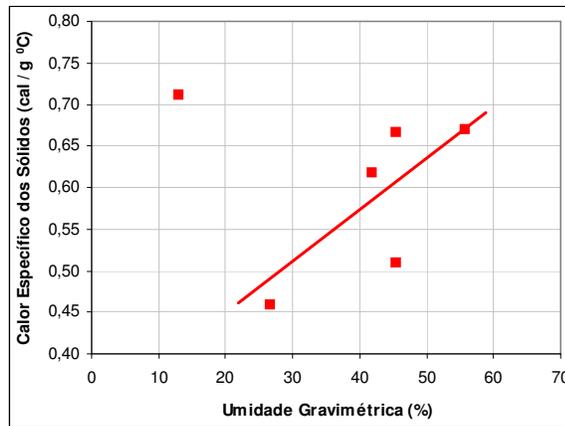
Tabela 51 – Dados de corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – C80.

CP	w (%)	S (%)	e	ρ_d (g/cm ³)	λ (W/mK)	c (cal/g ⁰ C)	D (mm ² /s)	c _s (cal/g ⁰ C)
01	64,54	100,00	1,72	0,98	1,11	0,55	0,21	1,11
02	57,54	99,21	1,48	1,07	1,16	0,53	0,23	1,01
03	53,90	97,45	1,54	1,05	1,16	0,52	0,23	0,97
04	36,91	95,38	1,03	1,31	1,43	0,46	0,37	0,61
05	28,02	87,50	0,85	1,44	1,52	0,42	0,40	0,57
06	20,84	76,58	0,72	1,54	-	0,39	-	-

A Figura 69 e a Figura 70 apresentam os gráficos que relacionam o c_s de C100 e C80 com a variação do índice de vazios e do teor de umidade gravimétrica.

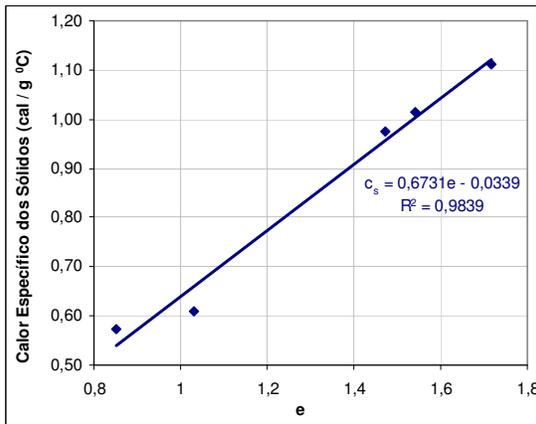


(a)

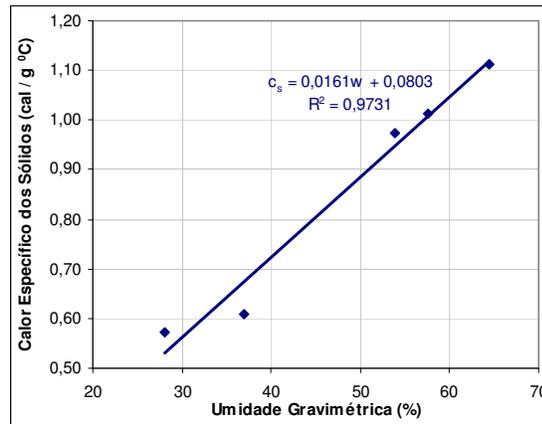


(b)

Figura 69 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x umidade gravimétrica (b) – C100.



(a)



(b)

Figura 70 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x umidade gravimétrica (b) – C80.

Os resultados de c_s para o solo C100 variaram de 0,46 a 0,71 mm²/s, enquanto os do solo C80 variaram de 0,57 a 1,11 mm²/s. Bristow (1998) sugere para argilas um valor de 0,263 cal/g0C. Duarte (2004) encontrou calor específico dos sólidos para temperatura de aproximadamente 400C de 0,223 cal/g0C, para um solo argilo-arenoso com teor de umidade de 1,92%.

As relações entre a difusividade térmica utilizada para o cálculo do c_s , o teor de umidade e o índice de vazios dos solos C100 e C80 estão apresentadas na Figura 71 e na Figura 72.

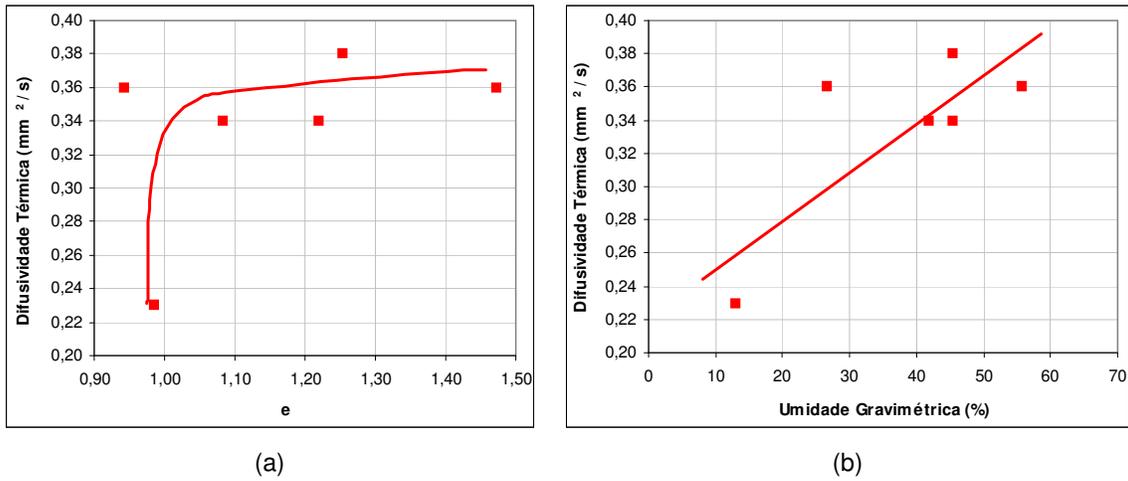


Figura 71 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x umidade gravimétrica (b) –C100.

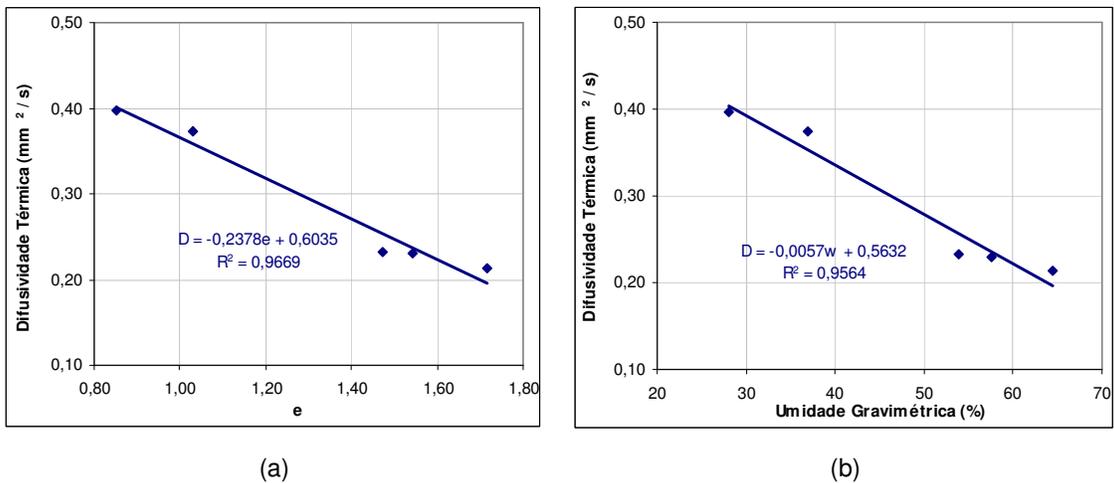


Figura 72 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x umidade gravimétrica (b) – C80.

Os resultados de difusividade obtidos não estão de acordo com os reportados na literatura. Krishnaiah e Singh (2003) citam alguns valores de difusividade térmica para argila seca e argila úmida, 0,15 e 0,32 mm²/s, respectivamente. Abu-Hamdeh (2003) apresenta resultados aproximados de 0,1 e 0,355 mm²/s para uma argila seca e com 45% de umidade respectivamente. Duarte (2004) encontrou difusividade térmica para temperatura de aproximadamente 40°C de 0,314 mm²/s, para um solo argilo-arenoso com umidade de 1,92%, respectivamente.

Os solos CB40 e CB60 saturados também apresentaram calor específico dos sólidos elevados e variáveis, como os solos anteriores.

5.3. Comparação dos Resultados Apresentados por diferentes Mineralogias

5.3.1. Condutividade Térmica

Os resultados de condutividade térmica obtidos e apresentados separadamente estão reunidos em apenas um gráfico para se verificar a influência da mineralogia nos resultados. A Figura 73 traz as relações entre a condutividade térmica e o índice de vazios para as Areias Mal Graduadas e Uniformes de secas a saturadas, para os solos C100, C80, CB40 e CB60.

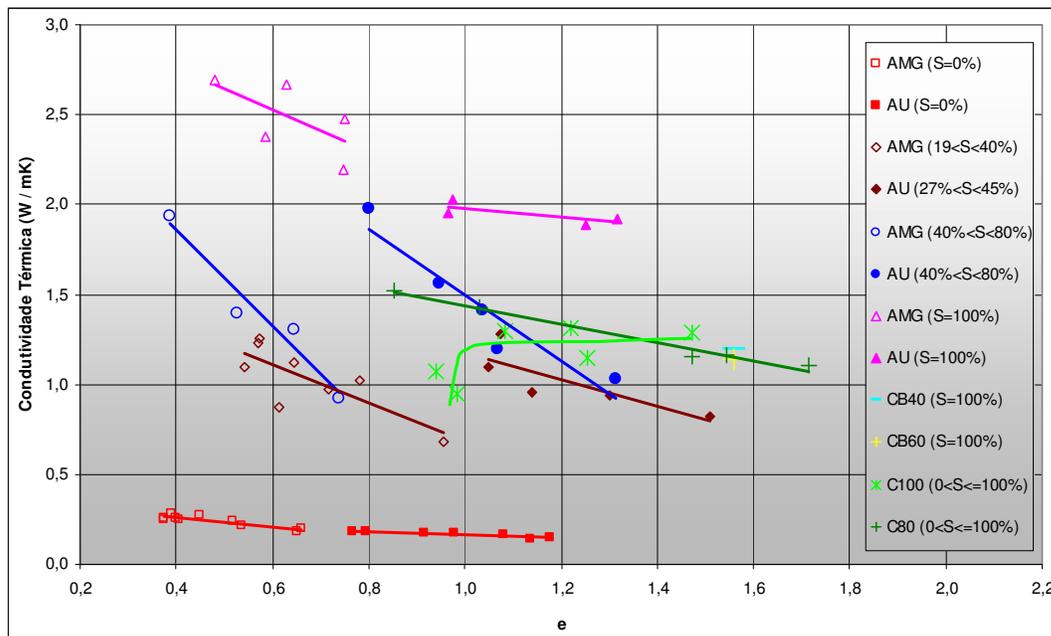


Figura 73 – Condutividade térmica x índice de vazios para diferentes Mineralogias.

Observando-se os resultados de condutividade térmica apresentados pelos solos C100, C80, CB40 e CB60 percebe-se que os mesmos estão dentro da faixa de valores apresentados pelas duas areias não saturadas. Vale salientar que os resultados de C100 e C80 apresentados vão do estado não saturado a saturado. Já os resultados de CB40 e CB60 são dos corpos de prova saturados.

As areias saturadas apresentaram maior capacidade de conduzir calor que as argilas e o solo areno-argiloso (CB40) estudados, mesmo possuindo menor teor de umidade, o que pode ser explicado pelo fato de as areias serem compostas por 100% de quartzo, o mineral de maior condutividade térmica conhecido.

Comparando o solo C100 com o solo C80 observa-se que para índices de vazios baixos, ou seja, baixas umidades, o solo C80 composto por 20% de bentonita de alta atividade apresentou condutividade térmica mais elevada que o solo C100, composto por 100% de Caulim de baixa atividade. Para índices de vazios mais elevados a situação se inverte e o solo C80 passa a apresentar uma menor capacidade de conduzir calor. Tal fato pode estar relacionado com o aumento da dupla camada difusa de água adsorvida e do teor de sais solúveis da bentonita devido à elevação da quantidade de água presente no solo C80, o que faz com que a condutividade diminua. No solo C100, o aumento da umidade com a elevação do índice de vazios melhora sua capacidade de conduzir calor.

Entre os solos CB40 e CB60 saturados, quanto maior a porcentagem de argila e menor a de areia, menor a condutividade térmica, o que já era esperado. Comparando estes solos com o C100 saturado, observa-se que os seus valores de condutividade térmica foram menores e mais próximos do solo C80 saturado. Mais uma vez a presença da bentonita causou a redução da capacidade dos solos de conduzir calor.

5.3.2. Calor Específico

Os resultados de calor específico obtidos e apresentados separadamente estão reunidos em apenas um gráfico para se verificar a influência da mineralogia nos resultados. A Figura 74 traz as relações entre o calor específico e o índice de vazios para as Areias Mal Graduada e Uniforme de secas a saturadas, para os solos C100, C80, CB40 e CB60.

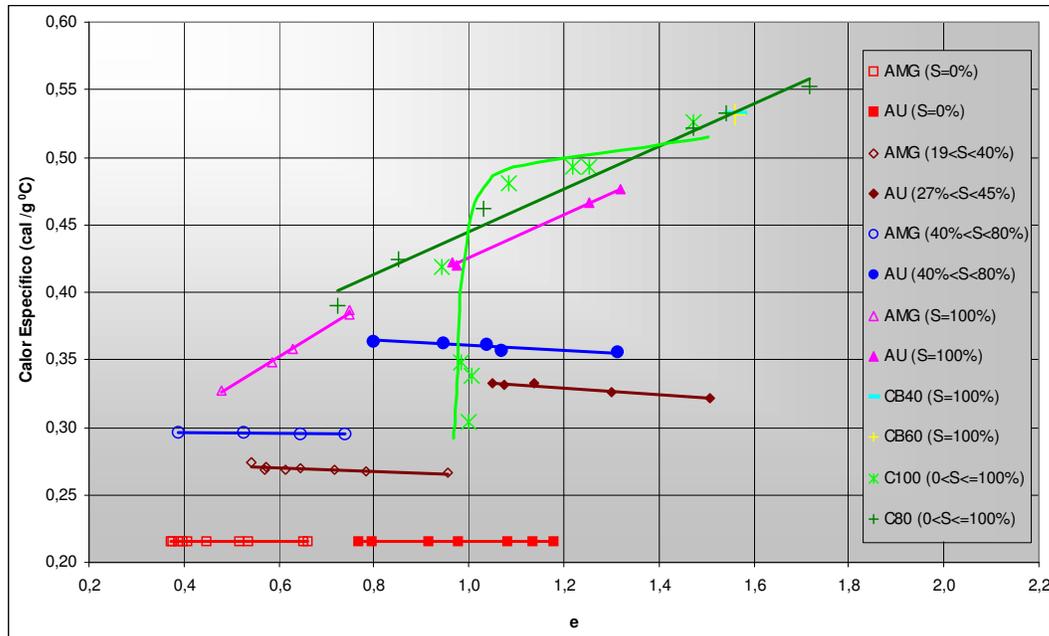


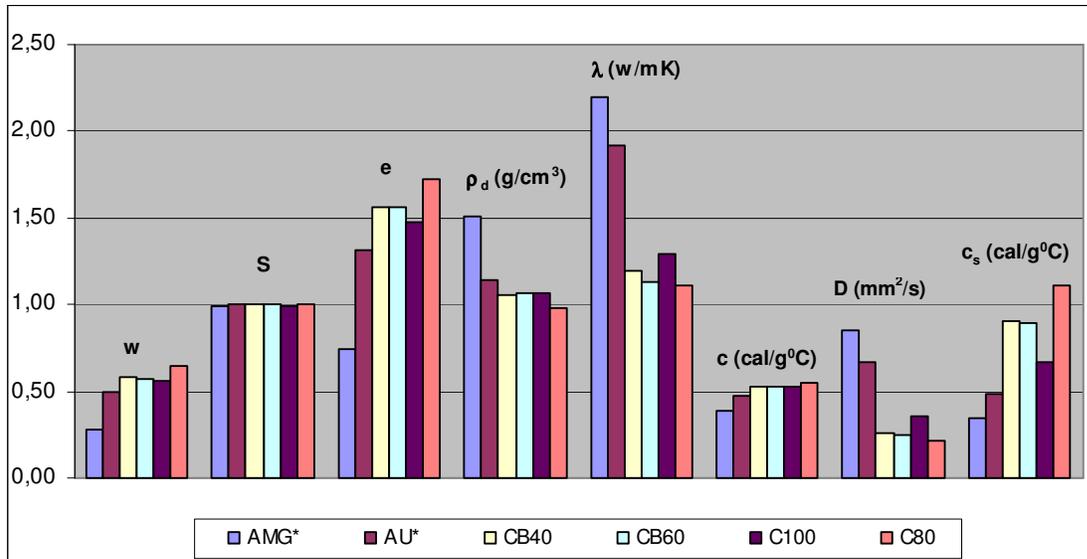
Figura 74 – Calor específico x índice de vazios para diferentes Mineralogias.

A partir dos resultados apresentados na Figura 74 observa-se que em geral, as argilas e o solo areno-argiloso estudados, não saturados e saturados, apresentaram maior calor específico que as areias não saturadas e saturadas. Seguindo este comportamento, se estes solos tivessem sido ensaiados compactados secos ou na umidade higroscópica, é provável que os resultados de calor específico também fossem mais elevados que os apresentados pelas areias secas.

Observa-se que quanto menor o teor de umidade, o solo C100, como já foi apresentado, vai atingindo um índice de vazios constante, ou seja, deixa de sofrer retração, conforme discutido anteriormente. Os solos C80, CB40 e CB60 certamente apresentariam comportamentos semelhantes se atingissem umidades mais baixas, devido à presença de argila expansiva em suas composições.

O solo C100 em umidades mais baixas, ou seja, para índices de vazios menores, apresentou calor específico próximo das areias não saturadas.

A Figura 75 apresenta um gráfico reunindo e comparando alguns índices físicos e resultados de parâmetros térmicos obtidos para os solos saturados estudados.



* - Apenas um ponto de AMG e AU saturadas foi considerado, o de maior índice de vazios.

Figura 75 – Comparando diferentes Mineralogias em solos saturados.

Observa-se na Figura 75 que, considerando-se os solos estudados saturados, quanto maior o teor de argila presente, maior o teor de umidade, maior o índice de vazios e menor a massa específica seca. Por outro lado, quanto maior o teor de argila presente nos solos, menor a condutividade térmica, maior o calor específico, menor a difusividade térmica e maior o calor específico dos sólidos.

É importante ressaltar que os resultados de difusividade térmica (D) e do calor específico dos sólidos (c_s) devem ser verificados e validados através da aplicação de outra metodologia para determinação de D e outra formulação para a estimativa de c_s .