

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Tânia Oliveira Américo Pessoa**

**Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e  
Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos  
Anna Paula Lougon Duarte  
Franklin dos Santos Antunes

Rio de Janeiro, setembro de 2006.



**Tânia Oliveira Américo Pessoa**

## **Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**  
Presidente/Orientador  
PUC-Rio

**Anna Paula Lougon Duarte**  
Co-Orientadora  
PUC-Rio

**Prof. Franklin dos Santos Antunes**  
Co-Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. José T. Araruna Jr.**  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Roberto F. de Azevedo**  
UFV

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de setembro de 2006.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

**Tânia Oliveira Américo Pessoa**

Engenheira Civil formada pela Universidade Federal de Sergipe - UFS em 2004.

Ficha Catalográfica

Pessoa, Tânia Oliveira Américo.

Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos / Tânia Oliveira Américo Pessoa; orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos, Anna Paula Lougon Duarte e Franklin dos Santos Antunes. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

163f.: il; 30cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Propriedades térmicas. 3. Geotecnia ambiental. 4. Ensaio de laboratório. 5. Fluxo de calor em solos. I. de Campos Tácio Mauro Pereira. II. Duarte, Anna Paula Lougon. III. Antunes, Franklin dos Santos. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

Aos meus Pais, Luís e Salete, por todo amor e carinho, pelo exemplo de vida e  
pela educação que me deram.

Aos meus irmãos Patrícia, Susi e Fredy por serem meus amigos sempre.

## Agradecimentos

A Deus pela vida, pela saúde e pela família que tenho.

Aos Professores Tácio e Franklin pela orientação.

À Anna Paula por fazer parte desse trabalho e da minha vida de forma tão especial. Obrigada pela orientação, incentivo, paciência e amizade.

À CAPES, FAPERJ/CNPq (PRONEX-Rio) pelo apoio financeiro.

Aos professores do Departamento pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao Prof. Franklin pelo ser humano que é.

À William, Sr. José, Amaury, Josué e Mônica Moncada pelo apoio no Laboratório de Geotecnia.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, Ana Roxo, Rita, Cristiano e Lenilson.

Aos meus pais por serem meus espelhos e meus guias, por toda história de vida, exemplo de força, dignidade e generosidade. Aos meus irmãos por serem meus irmãos e meus amigos, e a Deus mais uma vez por fazer parte desta família.

À minha irmã Patrícia e ao seu esposo Ludimar por terem me acolhido em seu lar, por todo apoio, carinho e paciência de sempre. Não tenho como agradecer.

Aos meus professores da UFS pelos conhecimentos transmitidos, e em especial aos professores Demóstenes, Erinaldo, Sandra Dórea e Ângela Sales pelos profissionais que são e por terem despertado em mim o gosto pela Geotecnia e pela vida acadêmica.

Aos meus queridos e saudosos colegas da Graduação, Gustavo, Zenóbio, Manoel e Bruno pela amizade, companhia e ajuda de sempre.

Aos meus colegas da Pós-Graduação, em especial às meninas, Elisangela, Taíse, Bernadete, Vivi e Carol pela amizade e apoio durante esses dois anos de curso.

Ao Homem da minha Vida, Júnior, por me trazer paz, alegria e muito amor.

## Resumo

Pessôa, Tânia Oliveira Américo; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Duarte, Anna Paula Lougon; Antunes, Franklin dos Santos. **Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos.** Rio de Janeiro, 2006. 163p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O conhecimento das propriedades térmicas dos solos é de grande importância em muitos projetos de engenharia e outras situações onde ocorre a transferência de calor nos solos, como em projetos de rodovias, de tubulações para petróleo, água, gás, cabos elétricos enterrados, aplicação de técnicas para remediação de solos contaminados, entre outros. A propagação de calor nos solos é governada pelas suas propriedades térmicas e essas propriedades devem ser determinadas experimentalmente. A presente Dissertação teve como objetivo principal a avaliação da influência da mineralogia, do índice de vazios e do teor de umidade em propriedades térmicas de solos. As principais propriedades térmicas dos solos são condutividade térmica, resistividade térmica, difusividade térmica e calor específico. Foram avaliados experimentalmente a condutividade, a difusividade, o calor específico dos solos e o calor específico dos sólidos. Trabalhou-se com misturas em diferentes proporções de materiais argilosos e arenosos. Os solos foram fabricados a partir de diferentes proporções de Caulim, Bentonita e Areia Quartzosa, formando-se nove solos diferentes. Os solos fabricados foram caracterizados física, química e mineralogicamente. Para a determinação da condutividade térmica e da difusividade térmica aplicou-se o método da sonda térmica de imersão em solos. O calor específico dos solos e o calor específico dos sólidos foram estimados através de equações propostas na literatura consultada. Os corpos de prova foram confeccionados por compactação estática e por vibração. Foi observado que os parâmetros térmicos são dependentes da umidade, do índice de vazios e da mineralogia dos solos de formas diferentes e, eventualmente, opostas, sendo a influência da umidade mais significativa. Foi proposta uma correlação para estimar o calor específico de areias quartzosas que depende apenas do teor de umidade gravimétrica.

## Palavras-chave

Propriedades térmicas; geotecnia ambiental; ensaios de laboratório; fluxo de calor em solos.

## Abstract

Pessôa, Tânia Oliveira Américo; de Campos, Tácio Mauro Pereira (advisor); Duarte, Anna Paula Lougon (advisor); Antunes, Franklin dos Santos (advisor). **Evaluation of Effects of Mineralogy, Voids Ratio and Moisture Content on Thermal Properties of Soils.** Rio de Janeiro, 2006. 163p. MSc. Dissertation – Civil Eng. Dept., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The knowledge of thermal properties of soils is of great relevance in many engineering projects where the transference of heat in soils occurs, such as: projects of highways, oil, water and gas pipeways, electric cables embedded in the ground and application of techniques for remediation of contaminated soil. The propagation of heat in the ground is governed by its thermal properties and these properties should be determined by laboratory tests. This Dissertation has as main objective the evaluation of the influence of mineralogy, voids ratio and water content in thermal soil properties. The main thermal properties of soils are thermal conductivity, thermal resistivity, thermal diffusivity and specific heat. Soil conductivity and diffusivity were obtained experimentally, while the specific heat of soil and specific heat of solids were obtained through equations proposed in the current literature. The soils used comprised mixtures in different ratios of clayey and sandy materials employing different ratios of commercially found Kaolin, Bentonite and Quartz pellets, forming nine different soils. The prepared soils were characterized in their physical, chemical and mineralogical aspects. For the determination of the thermal conductivity and the thermal diffusivity it was employed the methodology of insertion of a thermal needle in the soils. Both vibration and static compaction techniques were used in the preparation of the soil samples to be tested. It was observed that the thermal parameters are dependent on the water content, voids ratio and mineralogy of the soil in different and, eventually, opposite ways.

## Keywords

Thermal properties; environmental geotechnical; laboratory tests ; heat flow in soil.



## Sumário

1 Introdução	21
1.1. Estrutura da Dissertação	22
2 Revisão Bibliográfica	24
2.1. Propriedades Térmicas dos Solos	24
2.1.1. Condutividade Térmica	27
2.1.2. Resistividade Térmica	32
2.1.3. Calor Específico e Capacidade de Aquecimento Volumétrico	33
2.1.4. Difusividade Térmica	37
2.2. Fatores que Influenciam as Propriedades Térmicas dos Solos	38
2.2.1. Estrutura e Porosidade dos Solos	39
2.2.2. Mudanças na Estrutura dos Solos	40
2.2.3. A Água nos Solos	40
2.2.4. Propriedades dos Componentes dos Solos	43
2.2.5. Íons e Sais presentes nos Solos	44
2.3. Mineralogia dos Solos	49
3 Características dos Solos Utilizados	54
3.1. Escolha do Material Utilizado	54
3.2. Preparação dos Solos Utilizados	57
3.3. Caracterização dos Solos Utilizados	63
3.3.1. Caracterização Mineralógica	63
3.3.2. Caracterização Química	65
3.3.3. Caracterização Física	68
3.4. Classificação dos Solos Utilizados	80
4 Ensaio de Laboratório	82
4.1. Preparação dos Corpos de Prova	82
4.1.1. Ensaio de Adensamento Convencional	82
4.1.2. Compactação Estática	86
4.1.3. Compactação por Vibração	90

4.2. Ensaaios de Laboratório	91
4.2.1. Condutividade Térmica	91
4.2.1.1. Metodologia de Ensaio	92
4.2.2. Calor Específico	94
4.2.2.1. Metodologia de Ensaio	95
5 Apresentação e Análise dos Resultados	96
5.1. Condutividade Térmica	96
5.2. Calor Específico	123
5.3. Comparação dos Resultados Apresentados por diferentes Mineralogias	149
6 Conclusões	153
6.1. Condutividade Térmica	153
6.2. Calor Específico	155
6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	157
Referências Bibliográficas	158

## Lista de figuras

Figura 1 - Esquema do fluxo de calor através de um elemento prismático de solo. (modificado de Bertulani, 2005)	27
Figura 2 – Comparações entre relações de condutividade térmica x grau de saturação (Duarte, 2004)	28
Figura 3 – Variação da temperatura da fonte de calor linear através do tempo	31
Figura 4 – Difusividade x Umidade Gravimétrica de argila e areia (Abu-Hamdeh, 2003).	47
Figura 5 – Condutividade térmica x fração de volume de ar (Tang e Cui, 2006)	48
Figura 6 – Estrutura Cristalina de argilominerais (Bastos, 2005)	51
Figura 7 – Estrutura das camadas e estrutura molecular dos argilominerais (Bastos, 2005)	52
Figura 8 – Localização da cidade de Prado no Sul do Estado da Bahia	55
Figura 9 – Mina de Caliman da Mineradora Monte Pascoal, Prado-BA (Bertolino, 2000)	56
Figura 10 – Localização das jazidas de Bentonita em Rio Negro na Argentina (Herrmann, 2001)	57
Figura 11 – Análise granulométrica inicial do material granular (areias quartzosas).	58
Figura 12 – Material granular	60
Figura 13 - Curvas granulométricas dos novos materiais granulares	61
Figura 14 - Difrátogramas de Raios X do Caulim e da Bentonita (lâminas normal e glicolada)	64
Figura 15 – Visão esquemática da Capacidade de troca catiônica (Lopes e Guidolin, 1989)	66
Figura 16 - Procedimento complementar para ensaio de densidade dos grãos	69
Figura 17 - Resultados das sedimentações com a Bentonita utilizando procedimentos diferentes	71
Figura 18 - Resultados das sedimentações realizadas com C100, C80, C60 e C40	72
Figura 19 - Resultados das sedimentações realizadas com os solos CB80, CB60 e CB40	73
Figura 20 - Curvas Granulométricas dos solos AMG (real), ABG (teórica) e AU 76	
Figura 21 - Resultados do ensaio de CTC pelo método de Azul de Metileno:	

Caulim (a); Bentonita (b)	80
Figura 22 – Prensa de Adensamento Convencional (Prensa Oedométrica) modelo Bishop	83
Figura 23 – Moldagem de corpo de prova para ensaio de adensamento convencional a partir de amostra deformada	84
Figura 24 - Curvas resultantes da etapa de carregamento dos ensaios de adensamento convencional	85
Figura 25 - Moldes utilizados na compactação dos corpos de prova	87
Figura 26 – Moldagem de corpo de prova para compactação estática	89
Figura 27 – Corpos de prova prontos e secando ao ar	89
Figura 28 – Molde de compactação (a) e mesa vibratória para a compactação das areias (b)	90
Figura 29 – Sonda térmica utilizada: modelo KD2-S	92
Figura 30 – Medição de parâmetros térmicos	93
Figura 31 - Curvas de condutividade térmica x índice de vazios – AMG e AU secas	97
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	100
Figura 33 – Curva de condutividade térmica x grau de saturação - AMG (19%<S<40%) e AU (27%<S<45%) não saturadas	100
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%)	101
Figura 35 – Curvas de condutividade térmica x índice de vazios (a), condutividade térmica x umidade gravimétrica (b) – AMG e AU saturadas	102
Figura 36 – Curva de umidade gravimétrica x índice de vazios – AMG e AU saturadas	103
Figura 37 – Curvas de condutividade térmica x índice de vazios – AMG e AU em diferentes graus de saturação e umidades gravimétricas	105
Figura 38 – Curvas de condutividade térmica x umidade gravimétrica – AMG e AU para diferentes índices de vazios	106
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	108

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	111
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)	114
Figura 42 – Previsões da condutividade térmica da Areia Mal Graduada pelos métodos de Kersten (1949) e Johansen (1975)	116
Figura 43 – Previsões da condutividade térmica da Areia Uniforme pelos métodos de Kersten (1949) e Johansen (1975)	117
Figura 44 – Ajuste de Ewen (1988) aos dados experimentais de AMG e AU (valores médios)	119
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	120
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)	122
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	126
Figura 48 – Curvas de calor específico x grau de saturação – AMG ( $19\% < S < 40\%$ ) e AU ( $27\% < S < 45\%$ ) não saturadas	126
Figura 49 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a), índice de vazios x grau de saturação (b) – AMG e AU não saturadas ( $40\% < S < 80\%$ )	127
Figura 50 – Curva de calor específico x grau de saturação – AMG e AU não saturadas ( $40\% < S < 80\%$ )	128
Figura 51 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a), índice de vazios x umidade gravimétrica (b) – AMG e AU saturadas	129
Figura 52 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – AMG e AU saturadas	130
Figura 53 – Curvas de calor específico x índice de vazios – AMG e AU em diferentes graus de saturação e umidades gravimétricas	131
Figura 54 – Curvas de calor específico x umidade gravimétrica – AMG e AU de secas a saturadas	132
Figura 55 – Curvas de calor específico x umidade gravimétrica – AMG e AU para diferentes índices de vazios	133

Figura 56 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a) e calor específico x umidade gravimétrica (b) – C100	135
Figura 57 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – C100	135
Figura 58 – Curvas de calor específico x índice de vazios (a) e calor específico x umidade gravimétrica (b)– C80	137
Figura 59 – Curva de calor específico x umidade gravimétrica – C80	137
Figura 60 – Calor específico dos sólidos dos solos x índice de vazios – AMG e AU secas	141
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	141
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%)	141
Figura 63 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x grau de saturação (b) – AMG e AU saturadas	142
Figura 64 – Difusividade Térmica x índice de vazios – AMG e AU secas	144
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	144
Figura 66 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x grau de saturação (b) – AMG e AU não saturadas (40%<S<80%)	144
Figura 67 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x grau de saturação (b) – AMG e AU saturadas	145
Figura 68 – Difusividade térmica x umidade gravimétrica – AMG e AU para diferentes índices de vazios	145
Figura 69 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x umidade gravimétrica (b) – C100	147
Figura 70 – Calor específico dos sólidos x índice de vazios (a), calor específico dos sólidos x umidade gravimétrica (b) – C80	147
Figura 71 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x umidade gravimétrica (b) –C100	148
Figura 72 – Difusividade Térmica x índice de vazios (a), difusividade térmica x umidade gravimétrica (b) – C80	148
Figura 73 – Condutividade térmica x índice de vazios para diferentes mineralogias	149

Figura 74 – Calor específico x índice de vazios para diferentes mineralogias	151
Figura 75 – Comparando diferentes mineralogias em solos saturados	152

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Condutividade Térmica de Solos (modificada de Hukseflux, 2005).	28
Tabela 2 – Propriedades Térmicas de Materiais distintos (modificada de Mitchell, 1993)	38
Tabela 3 – Misturas de Caulim, Bentonita e Areia Quartzosa utilizadas	54
Tabela 4 – Porcentagens de areia fina, média e grossa das areias quartzosas	59
Tabela 5 – Resumo das misturas do material granular	61
Tabela 6 – Resultados da Análise Química do Caulim e da Bentonita	66
Tabela 7 – Umidade higroscópica dos Solos utilizados	68
Tabela 8 – Densidade relativa dos grãos dos solos (Gs)	69
Tabela 9 – Limites de Atterberg dos solos estudados	77
Tabela 10 - Densidades máxima e mínima dos solos AMG e AU	78
Tabela 11 - CTC e Superfície Específica do Caulim e da Bentonita.	79
Tabela 12 – Características usadas e Classificação dos solos pelo SUCS	81
Tabela 13 – Valores de $C_v$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) e $K$ ( $\text{cm}/\text{s}$ ) resultantes dos ensaios de adensamento	85
Tabela 14 – Tensões de compactação aplicadas na moldagem dos corpos de prova	86
Tabela 15 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AMG seca	97
Tabela 16 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AU seca	97
Tabela 17 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AMG não saturada	99
Tabela 18 - Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AU não saturada	99
Tabela 19 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AMG saturada	102
Tabela 20 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – AU saturada	102
Tabela 21 – Intervalos de condutividade térmica em função da variação do índice de vazios e do grau de saturação – AMG e AU	104
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	106
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	106
Tabela 24 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – C100	108
Tabela 25 – Condutividade térmica do solo C100 na umidade higroscópica e saturado	110
Tabela 26 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – C80	111
Tabela 27 – Condutividade térmica da Bentonita na umidade higroscópica e saturada	113
Tabela 28 – Dados dos corpos de prova e resultados de condutividade térmica – CB40 e CB60 saturados	113
Tabela 29 – Diferenças entre os dados experimentais de AMG e AU e as previsões de Kersten (1949) e Johansen (1975)	118
Tabela 30 – Ajuste de Ewen (1988) para valores médios de condutividade térmica e grau de saturação	120
Tabela 31 – Ajuste de Ewen para as areias Mal Graduada e Uniforme ( $e_{\max}$ e $e_{\min}$ )	121
Tabela 32 – Diferenças entre os dados experimentais dos solos C100 e C80 e as previsões de Kersten (1949) e Johansen (1975)	122
Tabela 33 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AMG seca	124
Tabela 34 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AU seca	124
Tabela 35 - Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AMG não saturada	125
Tabela 36 - Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – AU não saturada	125
Tabela 37 – Dados de corpos de prova e resultados de calor específico – AMG saturada	129
Tabela 38 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico – AU saturada	129
Tabela 39 – Intervalos de calor específico em função da variação do índice de vazios e do grau de saturação – AMG e AU	130

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	132
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	133
Tabela 42 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – C100	134
Tabela 43 – Calor específico do solo C100 na umidade higroscópica e saturado	136
Tabela 44 – Dados dos corpos de prova ensaiados e resultados de calor específico obtidos – C80	136
Tabela 45 – Calor específico da Bentonita na umidade higroscópica e saturada	138
Tabela 46 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico – CB40 e CB60 saturados	138
Tabela 47 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – AMG de seca a saturada	140
Tabela 48 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – AU de seca a saturada	140
Tabela 49 – Intervalos de calor específico dos sólidos em função da variação do índice de vazios e do grau de saturação – AMG e AU	142
Tabela 50 – Dados dos corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – C100	146
Tabela 51 – Dados de corpos de prova e resultados de calor específico dos sólidos – C80	147

## Lista de símbolos

$c$  - calor específico do solo

$c_a$  - calor específico do ar

$c_s$  – calor específico dos sólidos

$c_w$  - calor específico da água na fase líquida

$C$  – capacidade de aquecimento volumétrica do meio poroso

$C_a$  – capacidade de aquecimento volumétrico do ar

$C_s$  - capacidade de aquecimento volumétrico dos sólidos

$C_w$  – capacidade de aquecimento volumétrica da água na fase líquida

$D$  - difusividade térmica

$D_s$  - diâmetro médio dos grãos

$\Delta T$  – variação de temperatura

$e$  – índice de vazios

$\gamma$  - peso específico

$\gamma_d$  - peso específico seco

$\gamma_w$  - peso específico da água

$IP$  – índice de plasticidade

$LL$  – limite de liquidez

$LP$  – limite de plasticidade

$\lambda$  - condutividade térmica do solo

$\lambda_q$  - condutividade térmica do quartzo

$\lambda_{sat}$  - condutividade térmica saturada

$\lambda_{seco}$  - condutividade térmica seca

$\lambda_w$  - condutividade térmica da água

$\rho_d$  - massa específica seca do solo

$\rho_w$  – densidade da água

$S$  - grau de saturação

$t$  – tempo

$T$  - Temperatura

$w$  - umidade gravimétrica

*"Reaja inteligentemente mesmo a um tratamento não inteligente".  
(Lao-Tsé )*