

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**Instituto de Geociências e Ciências Exatas**  
**Campus de Rio Claro**

**MEDIDA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE UM  
SOLO INCORPORADO COM RESÍDUO  
INDUSTRIAL DE SILICATO.**

Paulo Roberto Ferrari

Orientador: Prof. Dr. Roberto Naves Domingos

Dissertação elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Física - Área de Concentração em Física Aplicada - para a obtenção do título de Mestre em Física

Rio Claro (SP)

2002

536.23  
F375m

Ferrari, Paulo Roberto  
Medida da difusividade térmica de um solo incorporado  
com resíduo industrial de silicato / Paulo Roberto Ferrari. –  
Rio Claro : [s.n.], 2002  
76 f. : il., gráfs., fots., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Roberto Naves Domingos

1. Calor - Transmissão. 2. Difusividade térmica. 3.  
Resíduos. I. Título.

# **Comissão Examinadora**

Prof. Dr. Roberto Naves Domingos

Instituição: IGCE/RC

Prof. Dr. Jorge Roberto Pimentel

Instituição: IGCE/RC

Prof. Dr. Edson Salvador Octaviano

Instituição: AFA.

Paulo Roberto Ferrari

Aluno

Rio Claro, 19 de dezembro de 2002

Resultado: Aprovado – com as menções “Distinção e Louvor”

### **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha esposa, pela compreensão, paciência e amoroso incentivo, ingredientes vitais que me animaram a realizá-lo; e aos meus filhos que souberam entender o meu esforço e a ausência de pai.

## **Agradecimentos**

A Deus, Pai de Jesus e nosso, por ter-me concedido os dons necessários para que, neste momento muito particular da minha vida, eu pudesse conquistar mais um sonho; a Ele, que esteve e está sempre comigo em todos os momentos, rendo graças do mais profundo do meu ser.

Agradecimentos especiais às seguintes pessoas e entidades:

Prof. Dr. Roberto Naves Domingos por ter me aceito como Orientando e, principalmente, pela orientação segura, pelo incentivo e pela amizade, fundamentais para que a elaboração e o desenvolvimento dos trabalhos ocorressem de forma tranqüila.

Comissão Permanente do Magistério da Academia da Força Aérea – COPEMA/AFA – pelas dispensas semanais concedidas imprescindíveis para a consecução deste trabalho.

CAPES pela ajuda financeira fornecida por meio do convênio PROAP.

Professores do Programa de pós-Graduação em Física do IGCE, especialmente ao Prof. Dr. Jorge Roberto Pimentel e ao Prof. Dr. Gerson Santarine, pelos constantes gestos de incentivo e irrestrito apoio.

Amigos professores da Academia da Força Aérea – AFA – que juntos estivemos cursando disciplinas do Programa de Mestrado: Prof. José Roberto Locatelli Fonseca, Prof<sup>a</sup>. Sonia de Almeida, Prof<sup>a</sup>. Roseli Aparecida Fernandes Chierice e Prof. Antonio Luiz Ferrari, pelos constantes incentivos mútuos e ajudas das mais diversas espécies, que muito favoreceram o desenvolvimento de nossos trabalhos.

Amiga de todas as horas e dificuldades, Prof<sup>a</sup>. Rosângela de Oliveira Colabone, que concedeu-me a honra de te-la como companheira em todas as fases do trabalho, colaborando de maneira decisiva, particularmente nos momentos mais críticos e mais difíceis do desenvolvimento do mesmo, e incentivando-me a perseverar.

Bibliotecárias do IGCE/Santana, particularmente a Srta Mônica, pela paciência e pronto atendimento nas solicitações das bibliografias necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

Prof. Luis Roberto Salomão, docente e Coordenador Geral do Ensino Científico da Divisão de Ensino da AFA, pela inestimável colaboração emprestada a esse trabalho com a confecção do programa computacional auxiliar.

Prof. Sidiney Jorge Schinaider, docente da AFA, pelas fotos e constantes ajudas nas dificuldades surgidas com o uso dos softwares.

Cynthia Regina Ferrari, minha filha, por ter realizado a primeira revisão deste trabalho, pelos auxílios e sugestões importantes para o seu enriquecimento.

Ana Paula Ferrari, minha filha, por ter me auxiliado na preparação da apresentação.

Fábio Roberto Ferrari, meu filho, pela ajuda na digitação do trabalho.

“Todo homem é culpado pelo que não fez”

Voltaire

## Sumário

Índice	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclaturas	viii
Siglas	ix
Capítulo 1 – Introdução	01
Capítulo 2 – Revisão da literatura	05
Capítulo 3 – Materiais e método	13
Capítulo 4 – Análise experimental	28
Capítulo 5 – Conclusões e sugestões	58
Capítulo 6 – Referências bibliográficas	61
Anexos	68

# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	01
1.1 – Objetivos e justificativas	01
<b>Capítulo 2 – Revisão da Literatura</b>	05
<b>Capítulo 3 – Materiais e Método</b>	13
3.1 - Caracterização do problema	13
3.2 – Propriedades térmicas do solo	14
3.2.1 – Calor específico volumétrico	14
3.2.2 – Condutividade térmica	15
3.2.3 – Difusividade térmica	17
3.3 – Equação diferencial parcial da densidade de fluxo de calor no solo	18
3.4 – Resolução da equação diferencial parcial da densidade de fluxo de calor no solo em regime transitório	20
3.5 – Materiais	23
3.5.1 – Solo	23
3.5.2 – Resíduo	24
3.6 – Método	26
<b>Capítulo 4 – Análise experimental</b>	28
4.1 – Elementos do arranjo experimental	28
4.1.1 – Banho térmico	29
4.1.2 – Indicador digital de temperaturas e termopares	29
4.1.3 – Câmaras trocadoras de calor	31
4.1.4 – Corpos de prova	33
4.1.5 – Balança de precisão e estufa	35
4.2 – Montagem do arranjo experimental	36
4.3 – Procedimento experimental	37
4.3.1 – Preparo das amostras	37
4.3.2 – Seqüência de tomada de dados de temperatura	40
4.4 – Erros experimentais	41

4.4.1 – Tipos de erros	41
4.4.2 – Erros sistemáticos das medidas realizadas	42
4.5 – Resultados experimentais	44
4.5.1 – Apresentação e comentários dos valores de temperatura obtidos	44
4.6 – Cálculo da difusividade térmica	47
4.7 - Análise da equação usada para a determinação da difusividade térmica.	56
<b>Capítulo 5 – Conclusões e sugestões</b>	<b>58</b>
5.1 – Conclusões	58
5.1.1 – Conclusões experimentais	59
5.2 – Sugestões para a continuidade do trabalho	60
<b>Capítulo 6 – Referências bibliográficas</b>	<b>61</b>
<b>Anexos</b>	<b>65</b>
Anexo 1 – Programa em linguagem BASIC para cálculo da difusividade térmica	65
Anexo 2 – Resultados experimentais	68

## Resumo

O descarte de resíduos industriais constitui-se num problema para os agentes produtores e para a sociedade. O volume de resíduo produzido é bastante grande e, normalmente, são poluidores ambientais. Pesquisadores afirmam que a determinação das propriedades térmicas de um solo e do resíduo, pode colaborar na decisão de incorporar este ao solo, visando melhorar sua capacidade de difundir a energia necessária ao processo de crescimento das plantas. O presente trabalho foi desenvolvido com o propósito de obter a medida da difusividade térmica de um solo incorporado um resíduo industrial de silicato, em várias proporções. O método utilizado foi aquele proposto por CLIVATI (1991), adaptado para as condições da pesquisa. A partir dos valores obtidos para a temperatura com o tempo, as difusividades térmicas das amostras foram determinadas, comparadas entre si e com a literatura. Dos resultados concluiu-se que amostras de solo com resíduo incorporado na proporção de 10%, em massa, apresentaram valores de difusividade térmica muito próximos daqueles obtidos para o solo. Tais resultados indicam a possibilidade de se descartar esse resíduo no solo, em condições semelhantes às aquelas propostas neste trabalho.

Palavras chave: solo; resíduos industriais; transferência de calor; difusividade térmica.

## **ABSTRACT**

The dump of industrial residue, constitutes a problem for the agents that produce them and for the society. The amount of residue produced is quite voluminous and they are generally environment polluters. Researchers state that the determination of the thermal properties of the soil and of the residue can cooperate in the decision to the incorporate the residue into the soil, thus improving its capacity to diffuse the necessary energy for the growth process of the plants. This work has been developed with the purpose of determining the value of the thermal diffusivity of a soil in which an industrial residue of silicate was incorporated in various proportions. The method used was the one proposed by CLIVATI (1991) and adequate for the actual conditions. From the values obtained for the temperature in time function, the thermal diffusivities of the samples were determined, compared among themselves and with the current literature. The obtained results allow us to conclude that the soil samples with the residue incorporated at the proportion of 10% in weight, presented values of thermal diffusivities very close to those obtained from the barren soil. These results point out for the possibility of dumping this residue into the soil, in the conditions closed to those proposed in this work.

**Keywords:** soil; industrial residues; heat transfer; thermal diffusivity.

## Listas de figuras

Fig. 3.1 – Figura 3.1 – Relação entre a condutividade térmica e a umidade, segundo CAMPBELL, et al (1971)	18
Figura 4.1 – Curva de calibração do termopar 1 utilizado nas medições.	31
Fig. 4.2 – Detalhes da câmara trocadora de calor: entrada e saída da água, rosca de acoplamento, tampa (com rosca e o’ring) e dimensões relevantes.	32
Fig. 4.3 – Câmara trocadora de calor mostrando detalhes da entrada e saída de água, rosca de acoplamento e sua tampa com rosca interna e o’ring.	33
Fig. 4.4 – Desenho esquemático do corpo de prova e seus acessórios especificando sua dimensão relevante regiões de rosca interna e externa e orifício de entrada para termopar	34
Fig. 4.5 – Corpo de prova e seus acessórios, destacando-se o sistema de rosqueamento e de vedação hidráulica e o orifício central.	35
Fig. 4.6 – Esquema do arranjo experimental com indicação do sentido do fluxo da água circulante e das posições dos termopares.	36
Fig. 4.7 – Aparato experimental usado na aquisição de valores de temperatura das amostras (a) e destaque das câmaras trocadoras de calor com as indicações das posições dos termopares (b).	37
Fig. 4.8 – Valores de temperatura contra o tempo, medidas no centro do corpo de prova para as amostras secas ao ar.	45
Fig. 4.9 - Valores de temperatura contra o tempo, medidas no centro do corpo de prova para as amostras processadas para umidades gravimétricas maiores que 0,42 g/g.	46
Fig. 4.10 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de resíduo puro (100%), em função do tempo.	49
Fig. 4.11 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 1%, em função do tempo.	49
Fig. 4.12 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 2%, em função do tempo.	50
Fig. 4.13 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 5%, em função do tempo.	50
Fig. 4.14 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 10%, em função do tempo.	51

- Fig. 4.15 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo seco ao ar em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito. 54
- Fig. 4.16 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo úmido em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito. 54
- Fig. 4.17 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo com resíduo a 10%, seco ao ar, em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito. 55
- Fig. 4.18 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo com resíduo a 10%, úmido, em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito. 55
- Fig. 4.19 – Valores de difusividade térmica para uma amostra de solo seco ao ar, obtidos por meio da eq. (3.17), com  $n = 100$ , e por meio da eq. (3.18). 56

## Listas de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação textural do solo	7
Tabela 3.1 – Valores típicos aproximados dos calores específicos mássicos (c) e das densidades ( $\rho$ ) das frações constituintes do solo.	15
Tabela 3.2 – Valores médios de análise química do solo realizada pelo FertLab	24
Tabela 3.3 – Valores médios de análise química do resíduo, fornecidos pela indústria geradora	24
Tabela 3.4 – Valores médios de análise química do resíduo, realizada pelo FertLab	25
Tabela 3.5 – Valores médios de análise química de micronutrientes no resíduo, realizada pelo FertLab	25
Tabela 3.6 – Valores médios da caracterização por Raio-X do resíduo, realizada pelo Labogeo	25
Tabela 4.1 – Valores dos coeficientes angulares (a) e lineares (b) obtidos das curvas de calibração dos termopares.	30
Tab. 4.2 – Difusividade térmica média de todas as amostras	52

## Nomenclaturas

### Latinas

<b>c</b> – calor específico	[J/Kg °C]
<b>c<sub>m</sub>; c<sub>o</sub>; c<sub>a</sub>; c<sub>g</sub></b> – calor específico volumétrico da matéria mineral, matéria orgânica, água e fração gasosa do solo, respectivamente	[J/m <sup>3</sup> °C]
<b>f<sub>m</sub>, f<sub>o</sub>, f<sub>a</sub>, f<sub>g</sub></b> - fração volumétrica da matéria mineral, matéria orgânica, água e fração gasosa do solo, respectivamente	[adimensional]
<b>k</b> – condutividade térmica da amostra	[W/m °C]
<b>L</b> – comprimento da célula contendo a amostra	[m]
<b>m<sub>A</sub></b> - massa da amostra	[g]
<b>m<sub>S</sub></b> - massa de solo	[g]
<b>m<sub>R</sub></b> - massa de resíduo	[g]
<b>p</b> - percentagem de massa de solo	[adimensional]
<b>q</b> - percentagem de massa de resíduo	[adimensional]
<b>q<sub>x</sub></b> – fluxo de calor através da amostra	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>t</b> – tempo	[s]
<b>T</b> – temperatura	[°C]
<b>x</b> – coordenada de posição	[m]

### Gregas

<b>α</b> - difusividade térmica da amostra = k/ρc <sub>v</sub>	[m <sup>2</sup> /s]
<b>ρ</b> - densidade da amostra	[Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>θ</b> - temperatura generalizada = T –T <sub>i</sub>	[°C]
<b>θ<sub>g</sub></b> – umidade gravimétrica ou base peso	[g/g]

## **Siglas**

AFA - Academia da Força Aérea.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

COPEMA/AFA - Comissão Permanente do Magistério/Academia da Força Aérea.

FertLab - Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP – Campus de Jaboticabal.

UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

IGCE – Instituto de Geociências e Ciências Exatas (da UNESP – Rio Claro, S. P.).

Labogeo – Laboratório do Departamento de Petrologia do IGCE.

CEA – Centro de Estudos Ambientais (da UNESP – Rio Claro, S. P.).

# **Capítulo 1**

## **Introdução**

### **1.1 – Objetivo e justificativas**

O objetivo dessa pesquisa consiste na determinação experimental de uma das mais importantes propriedades térmicas – a difusividade - de um solo, ao qual foi incorporado um resíduo industrial de silicatos, coletado junto a uma indústria localizada no município de Rio Claro, estado de São Paulo.

A geração de resíduos está diretamente relacionada a fatores como: aumento populacional, grau de industrialização, condições sócio-econômicas, área relativa de produção, hábitos e costumes próprios da cultura de cada povo, nível educacional, poder aquisitivo de bens de consumo, condições climáticas, variações sazonais, atividades de coleta, regulamentações específicas, etc.

A Norma 10.004 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, citada por CAMPOS (2002), define que “são considerados resíduos sólidos industriais ou

resíduos em estado sólido e semi-sólido aqueles que resultem da atividade industrial, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas residuárias, os gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isto, soluções economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível". Ainda citando a referida norma, o autor afirma que os resíduos são classificados em três classes:

classe I (perigosos): aqueles que apresentam riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

classe II (não inertes): aqueles que podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, porém não se enquadram como resíduos das classes I ou III;

classe III (inertes): aqueles que não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas.

Toda uma legislação referente à caracterização, lixiviação, solubilização, amostragem e transporte de resíduos também foi elaborada pela ABNT e encontra-se atualmente em vigor.

LUCIANO (2000) afirma que a legislação brasileira considera os agentes geradores de resíduos, neste caso a indústria, como os responsáveis pelo gerenciamento dos mesmos e estes agentes, via de regra, também têm interesse na eliminação dos resíduos por eles produzidos, que necessitam de tratamento, armazenamento e transporte adequados. Existe a preocupação real por parte dos agentes que geram tais resíduos, com a disposição final e, principalmente, com o reaproveitamento de parte deles. Entretanto, mesmo quando contam com um processo de tratamento e reciclagem, tais agentes ainda produzem, ao final de tais processos, acúmulo de grandes quantidades de resíduos que, na maioria dos casos, constituem-se em agentes causadores de poluição ambiental. A armazenagem de tais resíduos é fonte de enormes problemas e, na maior parte das vezes, não é feita de forma adequada, resultando na

contaminação do solo e do lençol freático, ou provocando a sua lixiviação no solo, alterando as suas propriedades físicas e influenciando diretamente sobre o fluxo de água no solo.

CAMPOS (2002) afirma, ainda, que a geração de resíduos em quantidades cada vez maiores expõe a necessidade de iniciativas altamente profissionais e competentes para a sua gestão. O assunto é multifacetado e multidisciplinar e pressupõe a participação de pessoas com as mais variadas qualificações pois, na fronteira das especialidades envolvidas há, certamente, uma superposição do conhecimento. Trata-se, indubitavelmente, de um imenso desafio, porém estimulante, pois a percepção dessa realidade alavanca o desenvolvimento e a tecnologia, com grandes possibilidades de progresso. Estão envolvidos nesse esforço organismos oficiais de controle ambiental, institutos de pesquisas, universidades, empresas e outros setores organizados da sociedade. Na gestão de resíduos é importante considerar os esforços para a diminuição da geração dos mesmos, as iniciativas para a valorização e a reciclagem.

A partir de uma análise detalhada do resíduo, de um estudo do solo onde se pretende depositá-lo, de proporções otimizadas para a sua aplicação no solo e, principalmente, da determinação dos limites químicos, físicos e biológicos que garantam a maior segurança possível, é possível ter-se uma solução bastante satisfatória que traga benefícios ao meio ambiente e à sociedade. Nessas condições o resíduo deixa de ser rejeito para se tornar um condicionador para o solo.

Condicionadores de solo são materiais que, adicionados ao solo, melhoram a sua condição física. Podem ser orgânicos (humus, estrume animal, resíduo de colheita, etc.), sintéticos (como alguns polímeros); minerais (gesso, calcário, rocha moída, etc.) e umidificantes (como é o caso de alguns surfactantes). Todos promovem algum tipo de alteração em propriedades físicas do solo, alteram o conteúdo de matéria orgânica e modificam algumas propriedades químicas do solo.

Assim, a produção de conhecimentos relacionados com a maneira pela qual a incorporação desses resíduos interfere nas propriedades gerais do solo, pode resultar em

algumas respostas para o problema do destino final de alguns resíduos industriais, em especial os inorgânicos.

A quantificação dos processos que envolvem transferência de calor nos solos, como por exemplo balanço de energia na superfície terrestre, descrição física do ambiente da planta, aquecimento ou resfriamento, evaporação da água e troca de calor na superfície dos solos entre outros, exige o conhecimento prévio das propriedades térmicas do solo (DE VRIES e AFGAN, 1975, citados por CLIVATI, 1991), definido como um meio poroso.

A determinação das propriedades térmicas do solo (ao qual se adicionou resíduos minerais), tais como a condutividade, a capacidade e a difusividade térmicas são fundamentais, portanto, para uma decisão quanto ao fato de que a incorporação de um determinado resíduo inorgânico ao solo em proporções adequadas e em condição de umidade conhecida, resultaria ser considerada um benefício e o resíduo ser reconhecido como um condicionador de solo.

Por estas razões, o objetivo principal desta pesquisa se desdobra, em primeiro lugar, na tentativa de buscar uma solução parcial para o problema particular do descarte do resíduo-alvo da pesquisa e, em segundo lugar, na busca de ampliação de conhecimentos sobre o problema da eliminação de resíduos industriais de mesma classe que este.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

O solo é um sistema complexo, formado de uma mistura heterogênea de materiais sólidos, líquidos e gasosos que, neste trabalho, refere-se à camada externa e agriculturável da superfície terrestre. Segundo, por exemplo, REICHARDT (1996) sua origem é a rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares. As camadas superpostas que compõem o solo são chamadas horizontes e podem ser divididos de A a D. O conjunto dos horizontes é chamado de perfil do solo.

As diferentes partículas constituintes do solo, especialmente aquelas de dimensões coloidais, podem ser encontradas em estados que variam desde a completa dispersão até o de agregação perfeita. Na maioria dos solos, entretanto, ocorre somente uma agregação parcial das partículas individuais (JURY, et al, 1991)

A fração sólida do solo é composta de uma porção mineral, que contém partículas de vários tamanhos, formas e composição química e uma fração orgânica. A fração orgânica é muito heterogênea, contendo uma população diversificada de vida,

organismos vivos bem como resíduos de plantas e animais em diversos estágios de decomposição.

A fração líquida consiste de água que preenche parcial ou integralmente os espaços livres entre as partículas sólidas. Ela contém solutos que podem ter sido dissolvidos da porção mineral do solo ou podem ter entrado pela superfície do solo. A fração líquida é retida por forças intrínsecas do solo matriz e flui através dele de maneira variável dependendo da sua localização.

A fração gasosa ocupa a parte dos espaços porosos entre as partículas do solo que não é ocupada com água. Sua composição pode diferir consideravelmente do ar acima da superfície e pode mudar drasticamente num pequeno período de tempo. As relações físico-químicas entre os constituintes das fases sólida, líquida e gasosa são afetadas não somente pelas propriedades de cada componente mas, também, pela temperatura, pressão e luz (REICHARDT, 1996)

A fração sólida do solo tem uma influência dominante sobre muitos processos de transporte e retenção de água, calor e solutos. Então, a caracterização das propriedades físicas e químicas da fração sólida do solo é importante para o entendimento dos problemas ambientais e de práticas de agricultura do ponto de vista da pesquisa moderna da física do solo. A fração sólida consiste de partículas de formas e tamanhos muito diferentes, que variam desde o menor limite que é o estado coloidal até as frações de areia grossa e cascalho.

As propriedades físicas do solo dependem, essencialmente, da sua textura e da estrutura. A textura é caracterizada a partir da análise granulométrica do tamanho dos grãos e da porcentagem de ocorrência de partículas de tamanhos diversos. Cada solo recebe uma designação referente à sua textura, que fornece informação do tamanho das partículas mais frequentes. A tabela 2.1 apresenta uma classificação textural do solo, segundo DERISIO (1992).

Tabela 2.1 – Classificação textural do solo.

<b>Material</b>	<b>Diâmetro da partícula</b>
Argila	Inferior a 2 $\mu\text{m}$
Silte	Entre 2 e 5 $\mu\text{m}$
Areia fina	Entre 5 e 0,2 mm
Areia grossa	Entre 0,2 e 2 mm
Cascalho	Entre 2 e 20 mm
Pedregulho	Superior a 20 mm

A partir da porcentagem de cada fração (argila, silte e areia), é possível definir se o solo é argiloso, siltoso ou arenoso, ou seja sua classe textural.

O termo estrutura é utilizado para descrever o solo no que se refere ao arranjo, orientação e organização das partículas sólidas. A estrutura define, também, a geometria dos espaços porosos. Como o arranjo das partículas do solo é geralmente muito complexo para permitir qualquer caracterização geométrica simples, não existe meio prático de se medir a estrutura de um solo. Por isso, o conceito de estrutura do solo é qualitativo (REICHARDT, 1996).

PREVEDELLO (1996) destaca que se a temperatura do solo não permanecer dentro de certos limites, a atividade microbológica poderá ser interrompida, as sementes poderão não germinar e as plantas não se desenvolverem.

A energia pode ser transportada através do solo por diferentes processos, tais como radiação, condução e convecção de calor com ou sem a transferência de calor latente (JURY, et al, 1991), sendo que o processo da condução de calor é o principal e mais importante desses mecanismos (KIRKHAM & POWERS, 1972).

Em solos úmidos, o calor é transferido pelo movimento de água e, em alguns casos, pode ser levado através do solo, por difusão, devido à evaporação de água; a energia se desloca para regiões de temperaturas mais baixas onde o vapor de condensa. Nessa condição, portanto, a transferência não se processa apenas por condução e alguma transferência está relacionada – não linearmente - com o movimento de massa de ambos, água e vapor, e/ou ao calor latente armazenado (JACKSON & KIRKHAM, 1958; KIRKHAM & POWERS, 1972; JURY, et al, 1991).

JONES & KONKHE (1952) observaram que em solos muito secos ou muito úmidos a transferência de vapor d'água sob um determinado gradiente de temperatura, é desprezível; entretanto, para um valor intermediário de umidade (entre os limites do extremo seco e do completamente saturado) a transferência de calor atinge um valor máximo. Os autores relataram que esse valor máximo ocorreu em umidades volumétricas compreendidas na faixa de 0,031 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) para a areia e 0,105 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) para um solo franco

DE VRIES (1958) propôs uma equação para a densidade de fluxo de calor relacionando a condução de calor sensível para a água nos estados de vapor e líquido. Entretanto, o tratamento analítico desses processos é muito difícil porque requer o conhecimento da geometria do espaço poroso, além de necessitar que algumas condições de contorno sejam introduzidas para todas as interfaces sólido-líquido e líquido-gasoso. Para o regime permanente, a solução analítica foi desenvolvida para a direção horizontal, sendo que a solução para o regime transitório é muito complicada.

HADAS (1977) testou a metodologia proposta por DE VRIES (1958) e concluiu que o modelo fornece boa estimativa da transferência de calor em regime permanente, mas subestima o valor da transferência de calor em regime transitório.

DE VRIES (1958) e WOODSIDE (1958) propuseram modelos físicos para o cálculo da condutividade térmica, baseados nas frações volumétricas de seus constituintes e na forma das partículas de solo.

Em geral, os métodos mais utilizados para o determinação da condutividade térmica em regime transitório são os que utilizam fontes cilíndricas. Esses

métodos baseiam-se na resolução da equação diferencial para a densidade de fluxo radial, uma vez que a fonte de calor, assumida como infinita e alojada no centro da amostra e o solo como um meio infinito, homogêneo e isotrópico. Obtendo-se os valores do aumento da temperatura próximo à fonte de calor e conhecendo-se a quantidade de calor fornecida, pode-se determinar a condutividade térmica a partir da inclinação da curva da temperatura em função do logaritmo do tempo. DE VRIES & PECK (1957 e 1958) e GOLOVANOV (1969) propuseram variações e aprimoramentos dessa metodologia, procurando resolver os problemas que envolviam a magnitude do raio da coluna (corpo de prova), o tempo de aquecimento, o efeito da gravidade sobre a umidade da amostra, entre outros.

VAN WIJK & BRUIJN (1964) propuseram o uso de fontes térmicas planas. CHUDNOVSKI (1962), citado por CLIVATI (1991), verificou que as fontes térmicas cilíndricas são muito superiores que as planas, devido ao fato de haver menor deformação do solo.

SEPASKHAH & BOERSMA (1979) utilizaram três solos de diferentes texturas para estudar a influência da temperatura e da umidade na condutividade térmica. Observaram que o solo com textura grossa (areia franca) apresentou maior aumento na condutividade térmica por unidade de água adicionada do que solos com textura fina (franco e franco-argiloso-siltoso). Concluíram, também que, para altos valores de umidade, as diferenças na condutividade térmica entre os três solos foram mais acentuadas e provocadas, principalmente, pelas diferenças entre as condutividades térmicas das partículas individuais.

HADAS (1977b), mostrou que a condutividade térmica de solos com agregados secos tende a decrescer com o aumento do tamanho dos agregados e da porosidade. Nestes casos, o número de pontos de contato bem como a área de contato diminuiu. O autor demonstrou que o tipo de agregado pode, portanto, influenciar na condutividade térmica visto que agregados angulares possuem maior área de contato que os mais esféricos.

A influência da espessura e do arranjo geométrico do invólucro de água ao redor das partículas que conduzem a energia térmica de um grão de solo a outro na condutividade e difusividade do sistema foi estudada por AL NAKSHABAND &

KOHNKE (1965). Foi verificado que a condutividade térmica dos solos, para a mesma umidade, é maior em areia e pedregulhos, intermediária em solo barrento e menor em solo argiloso. A água tem uma condutividade térmica 30 vezes maior do que o ar, mas é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo.

A difusividade térmica dos solos pode ser obtida experimentalmente a partir da determinação, também experimental, de cada uma das grandezas físicas que compõe a sua definição: condutividade térmica, calor específico volumétrico e densidade. Os inconvenientes destes processos, tais como, dificuldades experimentais de obtenção da condutividade térmica e do calor específico volumétrico (são muitos os métodos conhecidos) e os acúmulos de erros inerentes aos processos experimentais, conduzem a valores de difusividade térmica muito distante dos valores reais (CHUNG & JACKSON, 1954).

Os métodos baseados em regime permanente são questionáveis pelo fato deste estado raramente ocorre em solos secos. Segundo JACKSON & TAYLOR (1986), citados por CLIVATI (1991), o uso desses métodos em solos úmidos torna-se restrito, em virtude dos problemas ocasionados pela movimentação de água e vapor sob gradientes térmicos.

Os problemas com a movimentação de água e o longo período de tempo necessário para que o gradiente térmico seja constante, são minimizados quando se determinam as propriedades térmicas do meio em regime transitório.

Geralmente, os métodos para o cálculo da difusividade térmica não levam em consideração aspectos não lineares como a transferência de água e vapor por fluxo de massa, quando se aplica gradiente térmico no solo. JACKSON & KIRKMAN (1958) e HADAS (1968), sugeriram que, quando tais fatores são levados em consideração, obtém-se a difusividade térmica real. Segundo eles, a difusividade térmica comumente obtida deve ser considerada como uma difusividade térmica aparente. Embora a difusividade térmica real seja de grande importância, sua aplicabilidade prática é restrita, visto que em condições de campo é praticamente impossível determinar a influência da transferência de calor por fluxo de massa, o que torna bastante interessante a determinação da difusividade térmica aparente (HADAS, 1977)

A determinação da difusividade térmica *in situ* pode ser feita, basicamente, pelo método da onda de temperatura e pelos métodos que utilizam fontes térmicas aplicadas ao solo (HADAS, 1974). Os métodos que utilizam a onda de temperatura na superfície, assumem que esta é dada como uma série periódica com período de 1 dia. A difusividade térmica pode ser obtida pela solução da equação de condução de calor, utilizando-se o 1º termo da série. Uma variação deste método é a utilização do máximo retardamento da temperatura com a profundidade.

JACKSON & KIRKHAN (1958), propuseram um método baseado no fato de que a onda de temperatura, ao penetrar no solo, tem a sua amplitude diminuída com o aumento da profundidade, sendo que a temperatura máxima sofre um atraso em relação à superfície. Eles aplicaram uma onda senoidal de calor de período conhecido à superfície do solo e monitoraram a temperatura em duas profundidades pré-estabelecidas. Com esses valores colocados num gráfico de temperatura em função do tempo, foi possível determinar os tempos em que ocorreram as temperaturas máximas nas profundidades estabelecidas. Procedendo dessa forma para diferentes valores de umidade, obtiveram uma relação funcional entre a difusividade e a umidade.

CHUNG & JACKSON (1954) propuseram um método para obtenção da difusividade térmica de materiais de baixa condutividade, onde a temperatura é função do tempo de aquecimento da amostra em banho-maria. Eles utilizaram a equação do fluxo de calor em coordenadas cilíndricas, sujeita a determinadas condições de contorno. Como a solução da equação é uma série altamente convergente que se reduz a um resultado simples, a difusividade térmica foi obtida por meio do coeficiente angular da curva que se obtém da solução da equação.

PARIKH et al (1979) aplicaram o método de CHUNG & JACKSON (1954) em materiais porosos como o solo, obtendo resultados compatíveis com a literatura.

Mais recentemente, CLIVATI (1991) propôs um método com a mesma fundamentação teórica e constatou a sua eficácia e rapidez na determinação da difusividade térmica de uma amostra de solo constituído por uma coluna finita de solo de comprimento  $L$ , sujeita a determinadas condições iniciais e de contorno e comparou os resultados com

aqueles obtidos por CHUNG & JACKSON (1954). A autora apoiou-se sobre uma base teórica simples – a lei de Fourier - com geometria cartesiana e com o fluxo de calor unidimensional.

O método proposto por CLIVATI (1991) fundamenta-se na solução da equação diferencial parcial que governa o fluxo transitório de calor, sob condições de umidade constante, sujeita a condições iniciais e de contorno adequadas. Segundo a autora, essa solução, que é uma série de Fourier, converge rapidamente para poucos termos e, com isso e mediante alguns artifícios de programas computacionais adequados, tornou-se possível a determinação de difusividade térmica da amostra. A autora serviu-se de um aparato experimental simples, de fácil construção artesanal, utilizou instrumental de laboratório também simples e preparou amostras de solos, em várias umidades, acondicionadas criteriosamente em tubos de PVC que, isoladas hidraulicamente por meio de finas placas de cobre, foram acopladas a trocadores de calor de água quente circulante, em ambas extremidades. O efeito desse arranjo foi o de produzir um fluxo de calor de regime transitório, necessário para as condições de contorno propostas, quando da resolução da equação diferencial, fossem satisfeitas. A temperatura das amostras, em intervalos regulares de tempo, foi medida no centro de cada uma delas. A partir dessas medidas a solução da equação diferencial, sendo uma série de Fourier convergente, permitiu a obtenção do valor médio da difusividade térmica do solo.

## **Capítulo 3**

### **Materiais e Método**

#### **3.1 – Caracterização do problema**

Para se atingir o objetivo principal deste trabalho – a determinação da difusividade térmica de um solo incorporado com um resíduo industrial de silicatos – tomou-se, como ponto de partida, o método proposto por CLIVATI (1991) em razão de sua simplicidade e da eficiência na obtenção dos resultados. Para a sua realização, um arranjo experimental foi idealizado e construído guardando-se, entretanto, estreita semelhança com aquele utilizado pela autora, esperando-se, com isso, obter valores para a difusividade que estivessem de acordo com aqueles previstos pela teoria.

A descrição das propriedades térmicas do solo e, particularmente das grandezas físicas que definem, matematicamente, a difusividade térmica, foi considerada importante para a compreensão do problema e para poder situá-lo no contexto da transferência de energia para o solo. Além disso, a fundamentação teórica e a solução da equação diferencial que rege o fenômeno da transferência de calor em regime transitório, base do método utilizado mereceu um tratamento adequado.

A caracterização química do solo e também do resíduo a ele incorporado, foi alvo de descrição detalhada pois, a partir dela, poder-se-ia estabelecer alguma previsão para os resultados e, desta forma, ainda que a literatura silenciasse sobre os valores da difusividade térmica do resíduo, o processo de determinação experimental da difusividade térmica das amostras de solo incorporado com esse resíduo, se desenvolvesse mediante alguma orientação relativamente segura.

## 3.2 – Propriedades térmicas do solo

### 3.2.1. – Calor específico volumétrico

O calor específico volumétrico de uma substância é definido como a quantidade de calor necessária para elevar de 1°C a unidade de volume da substância. Para uma mistura de materiais como o solo, o calor específico volumétrico do material composto é a soma dos produtos dos calores específicos volumétricos dos constituintes pela respectiva fração volumétrica. Assim, o calor específico volumétrico pode ser expresso pela relação, segundo REICHARDT (1996).

$$c_v = c_m f_m + c_o f_o + c_a f_a + c_g f_g \quad (3.1)$$

onde:

- $c_m, c_o, c_a, c_g$  = calor específico volumétrico da matéria mineral, matéria orgânica, água e fração gasosa do solo, respectivamente;
- $f_m, f_o, f_a, f_g$  = fração volumétrica da matéria mineral, matéria orgânica, água e fração gasosa do solo, respectivamente.

A tabela 3.1 apresenta os valores típicos dos calores específicos mássicos e das massas específicas das frações que constituem o solo, sugeridos por PREVEDELLO (1987).

Tabela 3.1 – Valores típicos aproximados dos calores específicos mássicos ( $c$ ) e das densidades ( $\rho$ ) das frações constituintes do solo.

Frações	$c$ ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
Mineral	712	2650
Orgânica	1926	1400
Água	4186	1000
Ar	1005	1,3

A partir de tais valores, o autor propôs a seguinte equação, que permite a determinação do calor específico volumétrico do solo:

$$c_v = 1,89.10^6 f_m + 2,70.10^6 f_o + 4,19.10^6 f_a \quad (\text{J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}) \quad (3.2)$$

onde o calor específico volumétrico da fração gasosa ( $f_g$ ) foi desprezado em virtude de possuir um valor insignificante, comparado com os demais.

A matéria orgânica possui um valor alto para o calor específico mássico, em torno de  $1926 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$  e, por esta razão, exerce maior influência no calor específico volumétrico do solo. A argila e a areia, que constituem a parte mineral do solo, possuem valores menores, em torno de  $712 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ .

Desde que a matéria orgânica não sofra alterações devido ao manejo, as frações volumétricas da matéria orgânica e mineral podem ser consideradas constantes e o calor específico volumétrico torna-se função somente da umidade. PREVEDELLO (1987) mostrou que quando o calor específico é relacionado com a umidade volumétrica, o coeficiente angular desta relação é unitário e o intercepto na ordenada indica o valor do calor específico da matéria orgânica para o material seco.

### 3.2.2. – Condutividade térmica

A condutividade térmica é definida por exemplo, segundo JACKSON & TAYLOR (1986), citados por CLIVATI (1991), como a quantidade de calor que flui

através de uma unidade de área por unidade de tempo sob um gradiente de temperatura unitário. Trata-se de uma propriedade térmica importante porque determina a capacidade do solo em armazenar energia e de transferi-la na forma de calor.

Como o solo é um meio granuloso, consistindo de frações sólidas, líquidas e gasosas, sua condutividade térmica, conforme JURY et al, (1991), dependerá das proporções volumétricas destes componentes, do tamanho e arranjo das partículas sólidas e da interface de contato entre as fases sólidas e líquidas.

O valor da condutividade térmica para o quartzo é  $26,3 \text{ mcal.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , quando medida paralelamente ao eixo do cristal, e  $16,0 \text{ mcal.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , quando determinada perpendicularmente ao seu eixo. Os valores das condutividades térmicas da água e do ar são  $2,4 \text{ mcal.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $0,06 \text{ mcal.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , respectivamente. Assim, a razão entre as condutividades térmicas do quartzo, água e ar é  $333 : 23 : 1$  (JURY, et al, 1991).

Devido a esta enorme diferença, é evidente que a condutividade térmica de um solo granuloso dependerá do íntimo contato das partículas sólidas e da quantidade de água que preenche o espaço poroso entre as partículas.

SEPASKHAH & BOERSMA (1979) analisaram o efeito da temperatura na variação da condutividade térmica quando provocada pela transferência de calor por fluxo de massa através dos poros preenchidos com ar. Foi observado que, para as temperaturas de  $25^\circ\text{C}$  e  $45^\circ\text{C}$ , a relação entre as respectivas condutividades térmicas é aproximadamente igual à unidade, para uma umidade volumétrica menor que 5%. A relação atingiu valores máximos quando de 22% a 35% do espaço poroso do solo foi preenchido com água. Isto correspondeu a umidades volumétricas de  $0,11 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $0,16 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  e  $0,21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , respectivamente, para os solos areia-franca, franco e franco-argilo-siltoso. Próximo à saturação este efeito diminuiu, pois o aumento da umidade causou uma diminuição do conteúdo de ar e, portanto, uma descontinuidade no espaço poroso. Os autores sugerem que o efeito da temperatura na condutividade térmica é maior quanto maior o espaço poroso preenchido com ar.

### 3.2.3 – Difusividade térmica

A difusividade térmica ( $\alpha$ ) é uma propriedade física definida pela relação entre a condutividade térmica e o produto do calor específico volumétrico pela densidade.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_v} \quad (3.3)$$

Ela expressa a velocidade de mudança da temperatura do material quando submetido a variações de temperatura externa. Quanto maior o valor de  $\alpha$ , mais rapidamente a energia térmica irá se difundir através do material. Ao contrário, materiais que possuem baixos valores de difusividade térmica, são capazes de reter a energia por mais tempo.

No caso do solo, entendido como meio poroso, este fator é de fundamental importância porque, sob este aspecto, pode ser considerado como fonte de energia vital para o desenvolvimento de vegetais.

A difusividade térmica dos solos, assim como a condutividade, é afetada pela umidade, textura, estrutura e densidade.

O comportamento da difusividade térmica, em função da umidade, está relacionado com a formação de áreas de contato nas partículas sólidas. Um aumento na umidade do solo provoca grande aumento na sua condutividade térmica, em virtude da água possuir condutividade térmica muito maior que a do ar. Entretanto, em altas umidades, o aumento do calor específico pela adição de água ganha mais importância sobre a condutividade térmica, fazendo com que ela decresça em relação à umidade. Isto se deve ao alto calor específico volumétrico da água ( $1,0 \text{ cal.cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) em comparação com os calores específicos da areia, argila e do ar. A figura 3.1 mostra a relação entre a condutividade térmica e a umidade da areia, argila e matéria orgânica (CAMPBELL, et al, 1971)

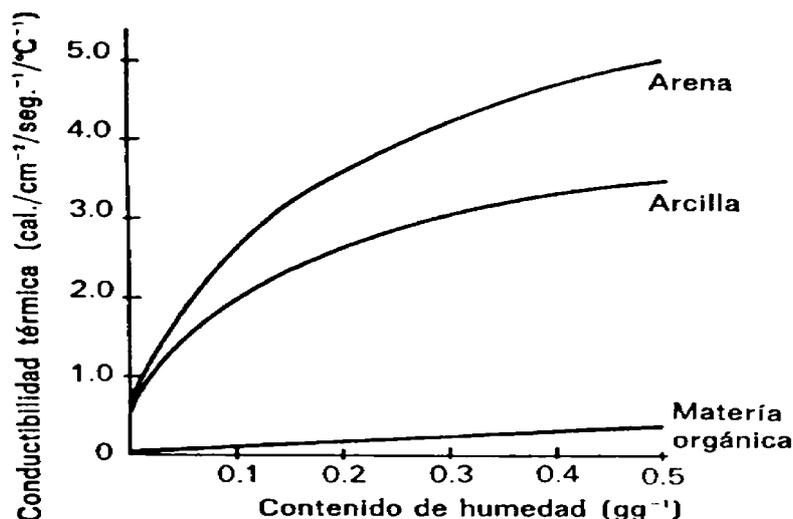


Figura 3.1 – Relação entre a condutividade térmica e a umidade, segundo CAMPBELL, et al (1971)

Os autores afirmam que o valor da difusividade térmica aumenta até um máximo porque, no início, a seção real das partículas do material aptas a transferir a energia térmica por condução aumenta mais rapidamente com o aumento da umidade do que o aumento da capacidade térmica. Esta última particularidade é, todavia, contraposta pela fração mineral quando a umidade é baixa. Com um posterior aumento da umidade, a condutividade térmica não aumenta tão rapidamente na proporção em que a capacidade térmica aumenta e, portanto, a difusividade térmica diminui.

### 3.3 – Equação diferencial parcial da densidade de fluxo de calor no solo

O transporte de calor dentro do solo ocorre por condução e por convecção, sendo que o processo por condução é preponderante (KIRKHAM & POWERS, 1972). Condução é o modo de transferir calor no qual a energia transferida acontece em sólidos, meios porosos como o solo, ou em fluidos em repouso (isto é, não há movimento convectivo resultante do deslocamento de porções macroscópicas do meio) da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura, devido à presença de gradiente de temperatura no corpo. O fluxo de calor não pode ser medido diretamente, mas o conceito tem significado físico, pois ele está relacionado à quantidade escalar mensurável chamada temperatura. Conseqüentemente, uma vez que a distribuição de temperatura no interior do

material é dada como uma função da posição e do tempo, o fluxo de calor pode ser determinado a partir das leis que relacionam o fluxo de calor ao gradiente de temperatura (ÖZİŞİK, 1980).

A lei básica que fornece a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura, baseada em observações experimentais, é chamada de lei de Fourier. Para um sólido homogêneo e isotrópico (isto é, material em que a condutividade térmica é independente da direção), a lei de Fourier é dada por:

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = -k \vec{\nabla} T(\vec{r}, t) \quad (3.4)$$

onde o gradiente de temperatura ( $\vec{\nabla} T$ ) é um vetor normal à superfície isotérmica, o vetor fluxo de calor  $\vec{q}(\vec{r}, t)$  representa o fluxo de calor por unidade de tempo e por unidade de área da superfície, na direção da temperatura decrescente, e  $k$  é chamada de condutividade térmica do material, sendo uma quantidade escalar positiva. Desde que o vetor fluxo de calor  $\vec{q}(\vec{r}, t)$  aponta na direção da temperatura decrescente, o sinal negativo é incluído na eq. (3.4) para que o fluxo de calor seja positivo.

Quando as condições do meio que envolve um corpo são subitamente mudadas, um certo intervalo de tempo transcorrerá até que a condição de regime permanente seja estabelecida. No regime permanente, a distribuição da temperatura e o fluxo de calor são somente função da posição e independem do tempo. Para estabelecer a dependência do fluxo de calor com o tempo, é necessário combinar a lei de Fourier com a equação da continuidade, a qual estabelece que a quantidade de calor no interior de um corpo, sem fontes nem sorvedouros de calor, não pode ser criada e nem destruída.

Neste caso, a equação geral tridimensional da condução do fluxo de calor num meio isotrópico é dada pela equação

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

Para condutividade térmica constante a eq. (3.5) pode ser escrita

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.6)$$

ou

$$\nabla^2 T(\vec{r}, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (3.7)$$

A eq. (3.7) é a equação diferencial parcial que governa a condução de calor em meios porosos isotrópicos, e indica que a taxa de variação da temperatura com o tempo é função da difusividade térmica e da taxa de variação espacial do gradiente de temperatura. Na dedução desta equação assumiu-se que o calor específico ( $c$ ) e a condutividade térmica ( $k$ ), e conseqüentemente a difusividade térmica ( $\alpha$ ), são independentes do tempo e da posição.

Partindo-se da hipótese de que o fluxo de calor ocorre apenas na direção  $x$  a eq. (3.7) pode ser reescrita como

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.8)$$

Esta equação pode ser escrita de uma forma mais conveniente pela introdução de uma variável  $\theta = T - T_1$ , chamada de temperatura generalizada. Então

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.9)$$

### 3.4 – Resolução da equação diferencial parcial em regime transitório

Quando as condições do meio que envolve um sistema são subitamente mudadas, um certo intervalo de tempo transcorrerá até que uma nova condição de equilíbrio seja estabelecida no corpo. Durante este intervalo de tempo o regime de transferência de calor não é permanente e, sim transitório.

Para analisar o problema de transferência de calor em regime transitório, a equação geral da condução de calor pode ser resolvida pelo método de separação de variáveis. Consideremos a placa infinita de espessura  $L$  e em equilíbrio térmico na temperatura  $T = T_i$ . No tempo  $t = 0$ , as superfícies são subitamente aquecidas até  $T = T_1$ .

Com a condição inicial e as condições de contorno:

$$\theta = \theta_i = T_1 - T_i \quad \text{para } t = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.9a)$$

$$\theta = 0 \quad \text{em } x = 0, \quad t > 0 \quad (3.9b)$$

$$\theta = 0 \quad \text{em } x = L, \quad t > 0 \quad (3.9c)$$

Admitindo para solução um produto na forma  $\theta(x, t) = X(x).H(t)$ , resultam duas equações diferenciais ordinárias

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \lambda^2X = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{dH}{dt} + \alpha \lambda^2H = 0 \quad (3.11)$$

onde  $\lambda^2$  é a constante de separação. Para que as condições de contorno sejam satisfeitas é necessário que  $\lambda^2 > 0$  e a solução assume a forma

$$\theta = (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sen \lambda x) e^{-\lambda^2 \alpha t} \quad (3.12)$$

Da condição de contorno (b),  $C_1 = 0$  para  $t > 0$ . Como  $C_2$  não pode ser igual a zero, da condição de contorno (c) concluímos que  $\sen L\lambda = 0$ , ou

$$\lambda = \frac{n\pi}{L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.13)$$

A forma final da solução é, portanto,

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\left(\frac{n \cdot x}{L}\right)^2 \alpha t} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (3.14)$$

Esta equação pode ser reconhecida como uma expansão em série de Fourier com a constante  $C_n$  determinada pela condição inicial (a)

$$C_n = \frac{2}{L} \int_0^L \theta_i \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{4}{n\pi} \theta_i \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (3.15)$$

A solução final é, então,

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_1}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \alpha t} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (3.16)$$

$$\frac{T - T_1}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \alpha t} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (3.17)$$

A eq. (3.17) permite obter a temperatura  $T$  do material no interior da placa de comprimento  $L$ , em qualquer posição e em qualquer instante, desde que as temperaturas nos extremos da placa sejam mantidas constantes e iguais a  $T_1$  durante o intervalo de tempo em que durar as medidas, após ela ter permanecido em equilíbrio térmico na temperatura  $T_i$  em qualquer posição. Esta equação também pode ser trabalhada objetivando a obtenção da difusividade térmica do material desde que as variáveis  $T$  e  $t$  sejam conhecidas. Esta tarefa, entretanto, necessita ser realizada mediante alguns artifícios porque o valor da difusividade  $\alpha$  não pode ser explicitado diretamente.

Os valores das temperaturas  $T_i$  e  $T_1$  são previamente conhecidos e, assim, a temperatura  $T$ , que pode ser coletada no centro da placa (onde  $x = L/2$ ) em cada instante, e o tempo  $t$ , são as variáveis necessárias para se obter a difusividade térmica  $\alpha$ .

Pode-se verificar que a eq. (3.17) é fortemente convergente para qualquer valor de  $\frac{\alpha t}{L^2}$ , como evidenciou CLIVATI (1991) ao plotar valores de  $\frac{T_{L/2,t} - T_1}{T_i - T_1}$  em função de  $\frac{\alpha t}{L^2}$ . Como consequência, para pequenos valores de n, o segundo membro da eq. (3.17) fica perfeitamente determinado.

Para a confecção do programa computacional descrito no anexo I, partiu-se do valor da difusividade calculada pela eq. (3.17), com n = 1, ou seja:

$$\alpha = \frac{L^2}{\pi^2 t} \ln \left[ \frac{4}{\pi} \frac{(T_i - T_1)}{(T_{L/2,t} - T_1)} \right] \quad (3.18)$$

Assim, para cada par  $(T_{L/2,t})$  a eq.(3.18) fornece um valor aproximado para a difusividade  $\alpha$ . O programa computacional foi desenvolvido de modo a ajustar rapidamente esse valor de  $\alpha$  para valores desde n = 1 até n = 100. O procedimento (rotina) permite operar com um erro máximo de 0,5 %.

## 3.5 – Materiais

### 3.5.1 – Solo

O solo utilizado neste trabalho é um solo residual e coluvionar, argiloso, marrom escuro a avermelhado, coletado na área externa do CEA (Centro de Estudos Ambientais), Campus da Bela Vista em Rio Claro. As porções coletadas (num total de aproximadamente 20 kg) foram retiradas do perfil A (da camada 0 –20 cm) para satisfazer as condições previstas na literatura referenciada. Em LUCIANO (2000) encontra-se a análise de rotina do referido solo, realizado pelo Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP (FertLab) – Campus de Jaboticabal. Tais valores médios de análises são apresentadas na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Valores médios de análise química do solo realizada pelo FertLab

<b>P</b>		<b>PH</b>							
<b>Resina</b>	<b>M.O.*</b>	<b>CaCl<sub>2</sub></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>H+Al</b>	<b>SB*</b>	<b>CTC*</b>	<b>V*</b>
mg/dm <sup>3</sup>	g/dm <sup>3</sup>		mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	%
6	38	4,2	1,3	8	5	80	14	94	15

OBS. **M.O.**: Matéria Orgânica; **SB**: Soma das Bases; **CTC**: Capacidade de troca de cátions; **V** = 100 **SB/CTC**.

### 3.5.2 – Resíduo

O resíduo sólido utilizado foi obtido de uma indústria de silicatos do município de Rio Claro, material que possui um alto teor de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), cerca de 75%, na sua composição. LUCIANO (2000) afirma que, em razão da incorporação desse resíduo no solo como finalidade intrínseca do trabalho, há necessidade de detalhar-se as características do mesmo, nas mais diversas amostras simples coletadas em diferentes partes do resíduo acumulado em pátio anexo à indústria. Os dados médios de análise química e de análise de micronutrientes contidos no resíduo, foram realizadas pelo Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP (FertLab) – Campus de Jaboticabal e os dados médios de análises do resíduo por Raio-X, foram realizadas pelo Departamento de Petrologia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP – Campus de Rio Claro (Labogeo). Tais análises são apresentadas, a seguir, nas tabelas 3.4, 3.5 e 3.6.

Tabela 3.3 – Valores médios de análise química do resíduo, fornecidos pela indústria geradora

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaCO<sub>4</sub></b>	<b>Voláteis</b>	<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>NaCl</b>	<b>pH</b>
%	%	%	%	%	
71,3	11,2	10,7	6	0,3	8,3

Tabela 3.4 – Valores médios de análise química do resíduo, realizada pelo FertLab

<b>P</b>	<b>PH</b>									
	<b>Resina</b>	<b>M.O.*</b>	<b>CaCl<sub>2</sub></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>H+Al</b>	<b>SB*</b>	<b>CTC*</b>	<b>V*</b>
	mg/dm <sup>3</sup>	g/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	Mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	mmol/dm <sup>3</sup>	%
2	1	8,6	0,8	652	48	5	701	706	99	

Tabela 3.5 – Valores médios de análise química de micronutrientes no resíduo, realizada pelo FertLab

<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
2,67	148,67	63,7	30,7	2,7

Tabela 3.6 – Valores médios da caracterização por Raio-X do resíduo, realizada pelo Labogeo

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>LOI</b>
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
74,75	0,09	0,63	0,71	0,01	1,15	8,13	2,32	0,06	0,04	11,13
traços										
<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Nb</b>	<b>Zr</b>	<b>Y</b>				
Ppm	Ppm	Ppm	Ppm	ppm	Ppm	ppm				
26	8	1	116	3	138	6				

Os valores médios dessas análises mostram, em resumo, que o resíduo industrial usado neste trabalho, contém pequena quantidade de íons não solúveis e, também, níveis bastante aceitáveis de metais pesados. Por outro lado, apresenta um valor de pH que o caracteriza como básico e contém interessantes quantidades de micronutrientes. Essas características sinalizam para a possibilidade do resíduo ser disposto no solo, sem produzir grandes alterações em suas propriedades químicas.

MONTAGNOLI DE ALMEIDA (2001) utilizou esse mesmo resíduo em seu trabalho de pesquisa sobre respirometria de solos incorporados com resíduos. Em razão das características explicitadas nas tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, mas em especial ao fato do

resíduo apresentar altas percentagens de silício em sua composição, assim como a presença de micronutrientes ( tabela 3.5), verificou que o mesmo aumenta a capacidade do solo no desenvolvimento de bactérias e microorganismos essenciais ao processo de biodegradação da matéria orgânica. Foi verificado que a maior eficiência do processo ocorreu na proporção de 65 % de resíduo para 35 % de uma mistura de solo com vinhaça (matéria orgânica)

### **3.6 – Método**

O método utilizado para se determinar o valor da difusividade térmica das amostras, foi baseado naquele proposto por CLIVATI (1991).

A partir do suporte teórico já descrito anteriormente, foi criado um arranjo experimental que permitiu que a condição inicial e as condições de contorno pudessem ser verificadas, além de possibilitar um fluxo de calor unidimensional. Tal arranjo experimental tornou possível, também, que a transferência de calor para as amostras se desse em regime transitório, outro fator condicionante imposto pelo desenvolvimento teórico.

Alguns dos elementos do arranjo experimental, como o corpo de prova e as câmaras trocadoras de calor, foram especialmente desenvolvidos para tornar possível a aquisição de valores de temperatura em função do tempo, fundamentais para viabilizar o cálculo da difusividade térmica a partir da equação (3.17).

Os corpos de prova foram feitos de material de muito baixa condutividade térmica, com a finalidade de minimizar as perdas de calor para a vizinhança e, ao mesmo tempo, permitir que o fluxo de energia ocorresse apenas no interior da amostra.

As câmaras trocadoras de calor foram confeccionadas a partir de tubos de aço inoxidável usinável, num sistema tal que permitisse um fácil e eficiente acoplamento com o corpo de prova, por ocasião das medidas de temperatura.

As amostras básicas de solo e de resíduo foram coletadas e preparadas com bastante antecedência, nas mesmas condições de umidade, antes que as amostras em várias proporções de solo com resíduo fossem produzidas e finalmente, acondicionadas nos corpos de prova e tratadas de modo a se obter umidades diferentes. A homogeneização das mesmas, ao serem acondicionadas nos corpos de prova, tornou-se imprescindível para que as condições teóricas de uniformidade previstas fossem satisfeitas.

Após a tomadas dos valores de temperatura, sempre realizadas de acordo com a mesma rotina, os dados obtidos tiveram que ser tratados adequadamente para que se pudesse obter, finalmente, os valores da difusividade térmica das amostras. Um programa computacional teve que ser desenvolvido a fim de que o valor da difusividade térmica, em cada instante, pudesse ser calculado a partir da equação (3.17), uma vez que a mesma é uma série de Fourier, convergente, e a difusividade térmica aparece no expoente de cada termo da série.

# **Capítulo 4**

## **Análise Experimental**

### **4.1 – Elementos do arranjo experimental**

O aparato experimental utilizado para a determinação da difusividade térmica das amostras se baseou no modelo proposto por CLIVATI (1991), ao qual se adicionaram modificações que tornaram o processo de aquisição das medidas de temperatura mais simples e mais seguro.

Tal aparato consistiu dos seguintes elementos: banho térmico com circulação de água, termopares para tomada de temperatura e indicador digital de temperatura, mangueiras de silicone para permitir o escoamento da água circulante, câmaras trocadoras de calor e corpos de prova (tubos cilíndricos para acondicionamento das amostras). Além destes, foram utilizados uma balança digital de precisão e uma estufa.

A montagem experimental foi realizada de forma a permitir que a transferência de calor em regime transitório e as condições iniciais e de contorno fossem satisfeitas.

#### **4.1.1 – Banho térmico**

O banho térmico usado na montagem experimental foi um modelo 2095 da marca MASTERLINE com capacidade de 18 litros e temperatura máxima de 50 °C. O aparelho é provido de um termostato para a regulação e fixação da temperatura da água, uma bomba elétrica para a manutenção da circulação da água.

#### **4.1.2 – Indicador digital de temperatura e termopares**

Para as medidas das temperaturas foram utilizados termopares de cobre-constantan ( $\text{Cu}_{57}\text{Ni}_{43}$ ) 24 AWG, com os fios isolados e de diâmetro 0,0005m, fundidos entre si com eletrodos de carvão através de descarga elétrica obtidas num VARIAC 110 x 140, ajustado para uma tensão de 40 volts.

Os termopares foram calibrados utilizando-se o banho térmico. Eles foram submetidos à variações crescentes e estabilizadas de temperatura. As temperaturas foram lidas num indicador digital de temperatura, modelo IOP THERM 400 – CE12, e comparadas aos valores indicados num termômetro de precisão INCOTERM, nº 77708, de mercúrio e bulbo de vidro, com precisão de 0,1°C.

No processo de calibração as temperaturas foram medidas em intervalos de 2°C, iniciando-se em 30°C até chegar a 50°C, tendo-se assim um bom número de pontos para a curva de calibração. Os pontos foram ajustados a uma reta, utilizando-se o método de regressão linear, obtendo-se assim expressões matemáticas que foram utilizadas na conversão da leitura dos termopares em valores reais de temperatura.

As equação de conversão utilizada para a conversão dos valores de temperatura tem a forma geral:

$$T_c = aT + b \quad (4.1)$$

onde : -  $T_c$  é a temperatura corrigida do termopar,  
 -  $T$  é a temperatura lida no registrador digital,  
 -  $a$  e  $b$  são os coeficientes angulares e lineares das curvas de calibração dos termopares, obtidos pelo processo de regressão linear.

Os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  obtidos para os termopares calibrados estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores dos coeficientes angulares ( $a$ ) e lineares ( $b$ ) obtidos das curvas de calibração dos termopares.

<b>Termopar</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
1	0,9164	2,6665
2	0,9278	2,5153
3	0,9164	2,4832
4	0,9229	2,3052
5	0,9159	2,5778
6	0,9307	2,482

A figura 4.1 mostra, como exemplo, a curva de calibração do termopar 1.

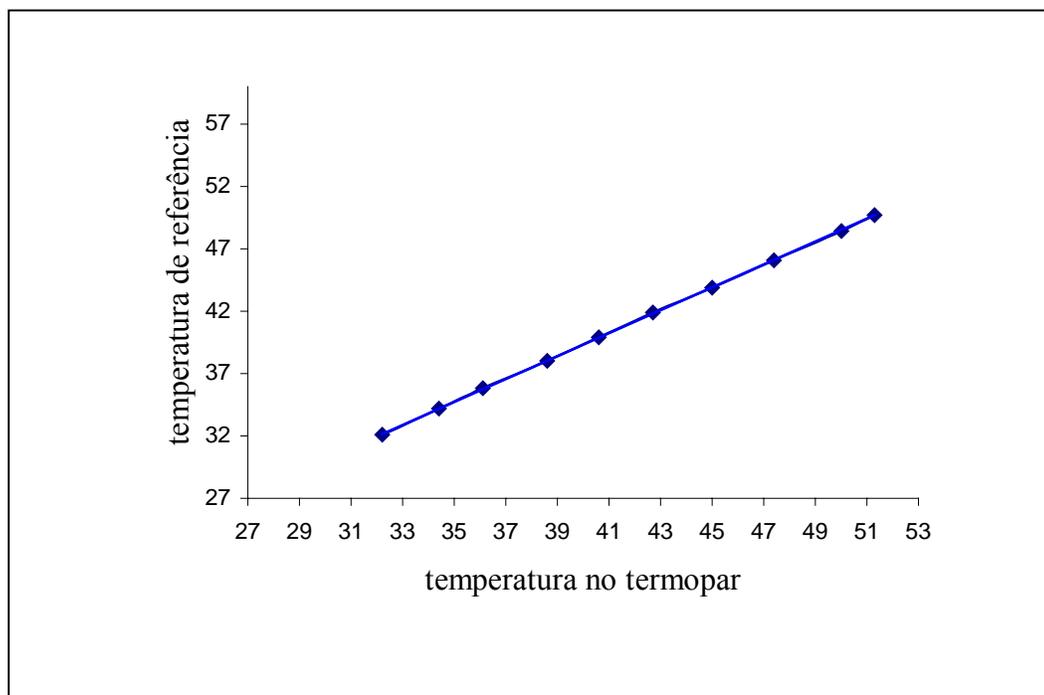


Figura 4.1 – Curva de calibração do termopar 1 utilizado nas medições.

### 4.1.3 - Câmaras trocadoras de calor

As câmaras trocadoras de calor, de forma cilíndrica, foram especialmente projetadas para a finalidade proposta e construídas artesanalmente com tubos de aço inoxidável, da classe 300 (usinável), com volumes suficientes para permitir perdas mínimas de calor para a vizinhança.

Na figura 4.2 são detalhados todas as características de cada trocador, além de suas dimensões relevantes.

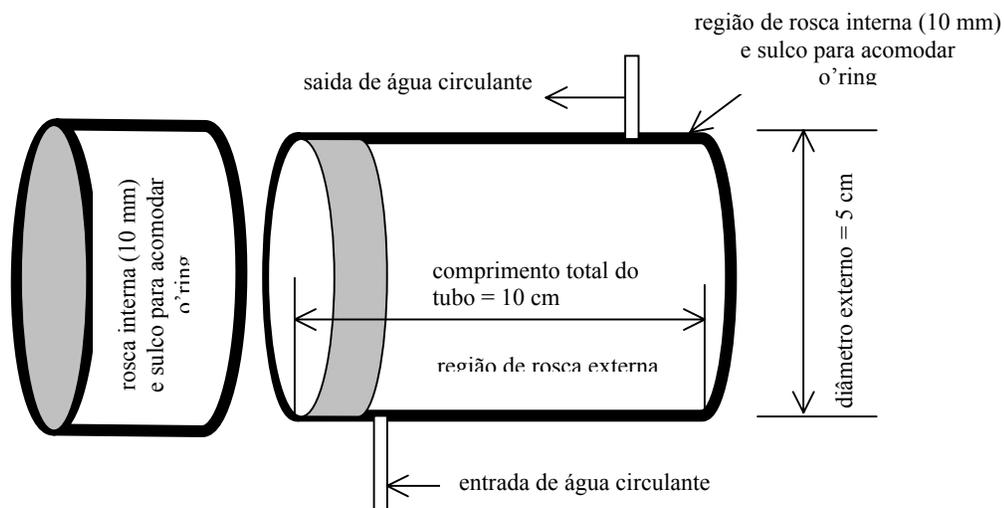


Fig. 4.2 – Detalhes da câmara trocadora de calor: entrada e saída da água, rosca de acoplamento, tampa (com rosca e o'ring) e dimensões relevantes.

O elemento à esquerda na figura 4.2 é uma tampa, também confeccionada em aço inoxidável, provida de rosca interna para ser acoplada ao trocador de calor toda vez que uma seqüência de medidas de temperatura iria ser iniciada. Essa tampa foi criada com as finalidades de inspeção do o'ring de vedação hidráulica e limpeza. Nas câmaras trocadoras de calor foram instalados, também por meio de roscas, dois tubos curtos, de aço inoxidável, para a entrada e a saída da água circulante.

O trocador de calor foi provido de rosca externa em uma extremidade (para receber a tampa) e de rosca interna na outra extremidade afim de se acoplar ao corpo de prova no qual uma das amostras foi acondicionada. Nesta mesma extremidade o isolamento hidráulico entre o trocador de calor e o corpo de prova foi obtido por meio de um disco de cobre, de 0,3 mm de espessura e de diâmetro igual ao diâmetro interno do trocador de calor (também igual ao diâmetro externo do corpo de prova), apoiado sobre um anel de borracha (o'ring) para a vedação hidráulica. O disco de cobre de espessura reduzida, além de promover

o isolamento hidráulico, tinha a finalidade de conduzir facilmente o calor da água circulante (a fonte térmica) para a amostra. Uma vez que a condutividade térmica do cobre é bastante elevada (cerca de  $1,0 \text{ cal s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), aliada à baixa espessura do disco, a transferência de calor da fonte térmica (água circulante) para a amostra ocorreu sem que houvesse perdas significativas.

As ligações hidráulicas entre os trocadores de calor e o banho térmico foram feitas por meio de mangueiras de silicone. Como havia apenas uma saída e uma entrada para a água circulante no banho térmico, foram usados dois desviadores de fluxo em forma de “Y”, feitos de vidro e de diâmetros compatíveis com os das mangueiras.

A figura 4.3 retrata os detalhes representados em esquema na figura 4.2.



Fig. 4.3 – Câmara trocadora de calor mostrando detalhes da entrada e saída de água, rosca de acoplamento e sua tampa com rosca interna e o’ring.

#### 4.1.4 – Corpos de prova

Os corpos de prova, em número de doze, foram construídos artesanalmente a partir de tubos cilíndricos de PVC, encontrados no comércio da construção civil, de 5 cm de diâmetro externo e de paredes cuja espessura é de cerca de 5mm. Cada corpo de prova é constituído de um tubo desse material, de exatamente 6 cm de comprimento, no qual foram feitas roscas externas em suas extremidades por, aproximadamente, 1 cm em cada uma. Tais roscas permitiram os acoplamentos com os trocadores de calor, durante cada seqüência de tomada de medida da temperatura. Para cada um dos tubos foram confeccionados, ainda, dois

outros anéis do mesmo tubo, com rosca interna em apenas uma extremidade, cuja finalidade foi a de, juntamente com dois discos de cobre, permitir a acomodação das amostras dos materiais a serem testados, a de armazená-los de forma isolada do ar ambiente e de possíveis alterações de suas umidades e de obter a sua saturação bem como a sua secagem em estufa.

O material usado para a construção artesanal dos corpos de prova (PVC) foi escolhido levando-se em conta dois aspectos importantes: baixa condutividade térmica, na faixa de  $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ cal} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  a  $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ cal} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , e alta resistência à deformação provocada pelo calor quando da permanência na estufa a  $105^\circ\text{C}$ .

A figura 4.4 mostra, esquematicamente, o corpo de prova e seus acessórios indicando as medidas relevantes.

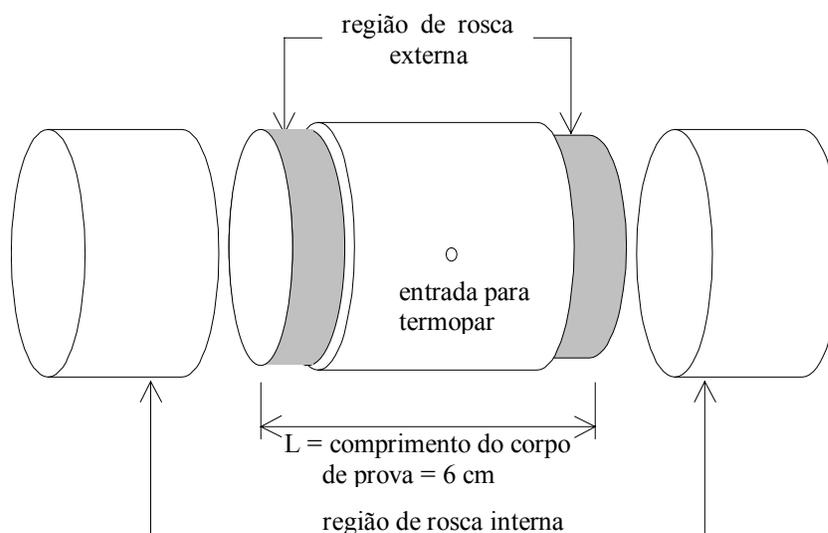


Fig. 4.4 – Desenho esquemático do corpo de prova e seus acessórios especificando sua dimensão relevante, regiões de rosca interna e externa e orifício de entrada para termopar.

Como se pode observar na figura 4.4, as partes destacadas com a coloração cinza representam as roscas externas por meio das quais o corpo de prova pode ser acoplado

aos seus acessórios, nas etapas de preenchimento com a amostra e armazenagem em isolamento ou com os trocadores de calor, na etapa de aquisição de dados de temperatura.

A figura 4.5 retrata os detalhes de um corpo e de seus acessórios, exibindo as regiões de rosca externa e interna, bem como o orifício central para a inserção do termopar usado nas tomadas de temperaturas da amostra.



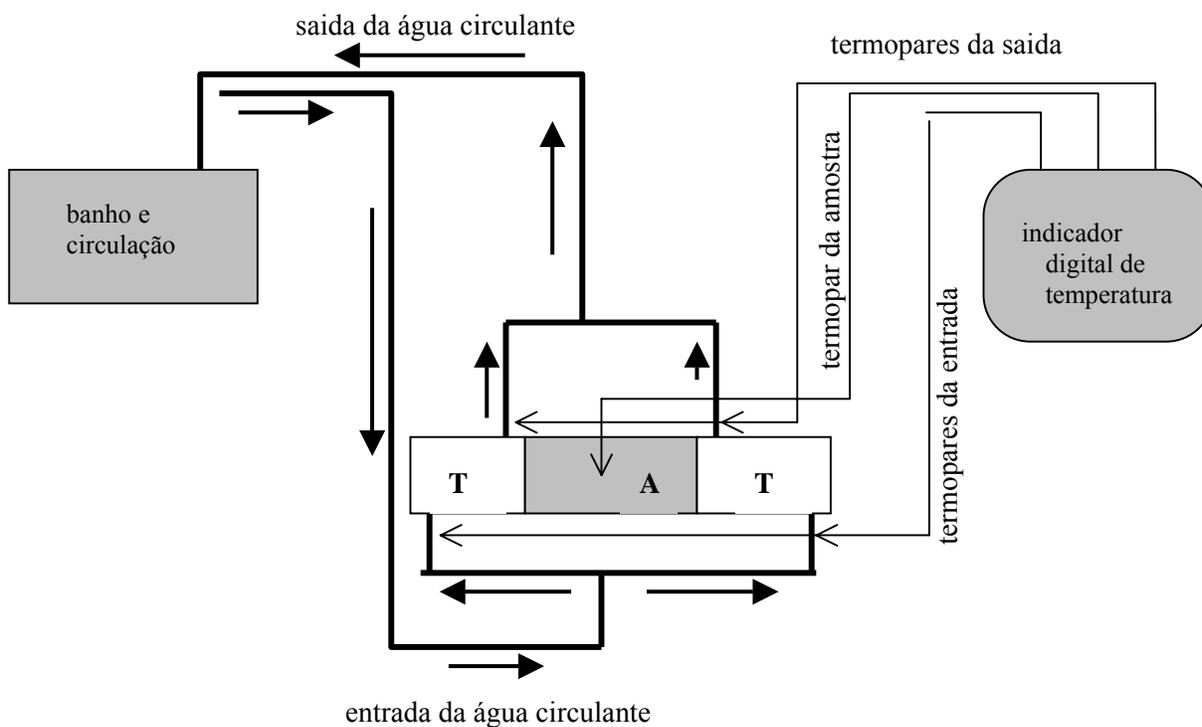
Fig. 4.5 – Corpo de prova e seus acessórios, destacando-se o sistema de rosqueamento e de vedação hidráulica e o orifício central.

#### **4.1.5 – Balança de precisão e estufa**

A balança de precisão, usada para a obtenção das massas das amostras, foi uma balança digital da marca MARTE, modelo AS 1000C, com precisão de 0,01 g e a estufa, usada para as secagens parcial e total das amostras, é do modelo RETILÍNEA, fabricada por FANEM Ltda, com capacidade de aquecimento até 200 °C.

## 4.2 – Montagem do arranjo experimental

O aparato experimental foi montado de acordo com o esquema apresentado na figura 4.6.



Legenda: A: amostra confinada no corpo de prova; T: câmaras trocadoras de calor.

Fig. 4.6 – Esquema do arranjo experimental com indicação do sentido do fluxo da água circulante e das posições dos termopares.

A figura 4.7 retrata os detalhes do arranjo experimental exibidos esquematicamente na figura 4.6.

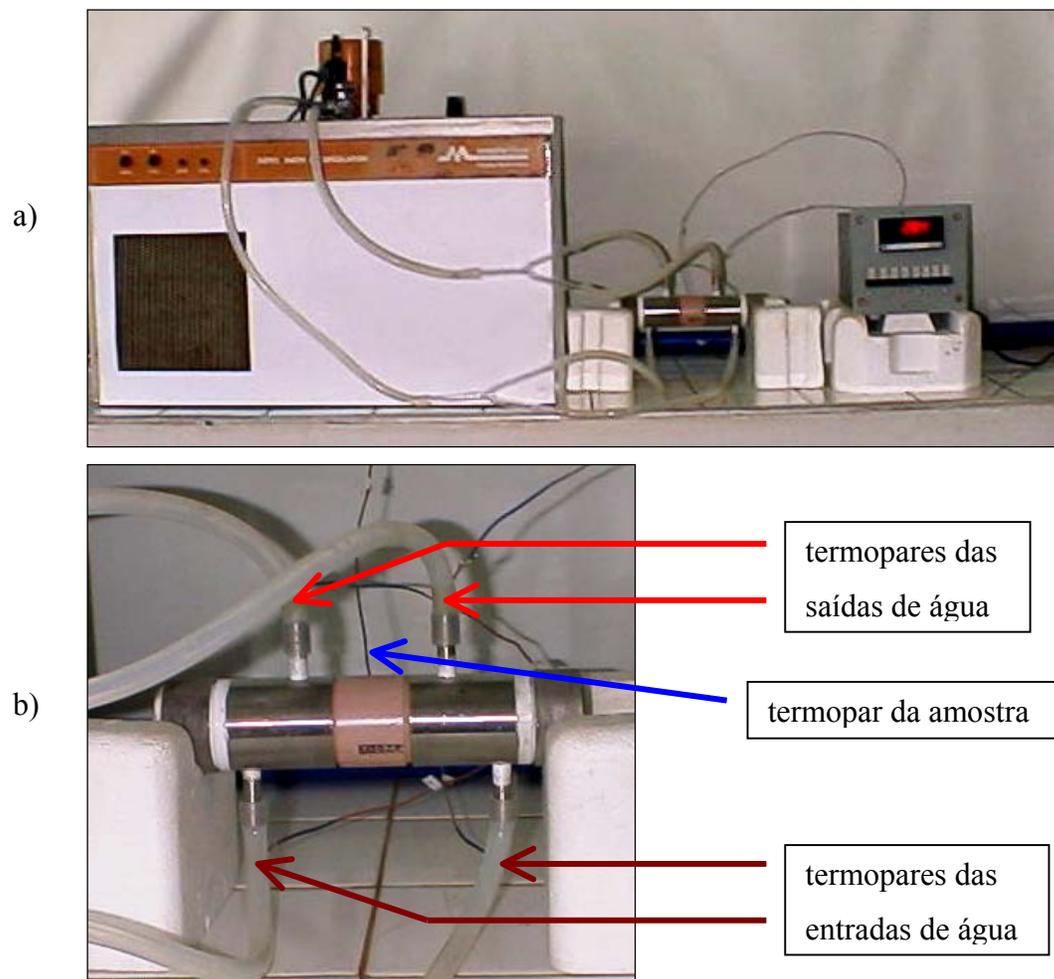


Fig. 4.7 – Aparato experimental usado na aquisição de valores de temperatura das amostras (a) e destaque das câmaras trocadoras de calor com as indicações das posições dos termopares (b).

### 4.3 – Procedimento experimental

#### 4.3.1 - Preparo das amostras

O solo, coletado na área do CEA, foi seco ao ar, peneirado com peneira de malha de 1 mm e acomodado em sacos plásticos impermeáveis para ser, posteriormente,

misturado ao resíduo, em proporções pré-determinadas e acondicionado adequadamente nos corpos de prova.

O resíduo foi coletado no pátio da indústria geradora, seco ao ar, triturado, peneirado com peneira de malha de 1 mm, acomodado em sacos plásticos impermeáveis para que, posteriormente, fosse incorporado ao solo nas proporções mássicas de 1%, 2%, 5% e 10% quando, então, foram acondicionados nos corpos de prova.

Foram preparadas seis amostras de materiais a serem testados sendo uma apenas de solo, nas condições já descritas, uma de solo com resíduo a 1%, uma de solo com resíduo a 2%, uma de solo com resíduo a 5%, uma de solo com resíduo a 10% e uma de resíduo apenas. O solo e o resíduo puros foram usados como referências experimentais. Neste processo foi usada a balança de precisão e as amostras percentuais foram calculadas segundo as expressões:

$$m_A = m_S + m_R \quad (4.2)$$

$$m_A = p.m_A + q.m_A \quad (4.3)$$

Onde:

- $m_A$  é a massa da amostra;
- $m_S$  é a massa de solo;
- $m_R$  é a massa de resíduo;
- $p$  é a percentagem de massa de solo;
- $q$  é a percentagem de massa de resíduo.

A soma  $p + q$  será sempre 100%.

Tais percentagens foram escolhidas tendo em vista a proposta de LUCIANO (2000), que já houvera testado as mesmas proporções do mesmo resíduo incorporado em solos

no seu trabalho experimental, quando desenvolveu estudo dos parâmetros hídricos do solo, particularmente a difusividade hidráulica e a sortividade.

Um fato observado quando da preparação das amostras mereceu atenção: imediatamente após o resíduo ser misturado ao solo suas partículas, todas de tamanhos menores que 1 mm, se aglutinavam em pequenos grãos de tamanhos variados mas muito maiores que 1 mm. Assim, quando misturado ao solo, o resíduo deixava de apresentar o sua aparência peculiar de pó fino, de aspecto coloidal, para assumir um aspecto granular semelhante ao de partículas de adubo misturado ao solo. Uma provável explicação para este fato poderia ser atribuído à propriedade do resíduo em absorver rapidamente água do solo. Resolveu-se não triturar as amostras com as diversas percentagens de resíduo em solo, por considerar que, por um lado, essa seria a forma “natural” com que o resíduo se incorpora ao solo e, por outro, que a manipulação extra poderia adulterar as condições das amostras em relação àquelas inicialmente propostas.

Foram preparados doze corpos de prova sendo dois de cada amostra pronta. Cada um dos corpos de prova teve o seu orifício central vedado e uma das tampas de PVC rosqueadas junto com o disco de cobre numa das extremidades, antes de ser criteriosamente preenchido com o mesmo volume de amostra. Todos eles foram compactados de forma muito semelhante. O orifício localizado no centro ( $x = L/2$ ) de cada corpo de prova foi feito com a finalidade de se inserir um termopar durante uma seqüência de aquisição de valores de temperatura.

Após o processo de preenchimento, a segunda tampa de PVC foi rosqueada junto com outro disco de cobre, na extremidade usada na operação de preparo, de modo que a amostra nele acondicionada ficasse totalmente isolada das possíveis variações de umidade do ar.

Dos dois exemplares de cada corpo de prova contendo a mesma amostra, um foi separado (num total de seis) e, em momento oportuno, o orifício central de cada um deles foi desobstruído e todos foram levados à saturação em água por 24 horas. Após esse período

de tempo, os seis exemplares foram levados à estufa a 80 °C por um período de 5 h e, depois, os seus orifícios centrais foram novamente vedados e os corpos de prova, contendo as amostras, ficaram repousando horizontalmente por duas semanas para que cessasse a redistribuição de água em seu volume e a umidade se tornasse uniforme. O objetivo desse procedimento foi a obtenção de amostras com valores de umidade mais ou menos próximos entre elas e diferentes daquelas outras seis que se encontravam na condição de secas ao ar.

### **4.3.2 – Seqüência de tomada de valores de temperatura**

Uma seqüência de aquisição de valores de temperatura somente era iniciada quando as seguintes condições eram verificadas: a) banho térmico cheio com água a 50 °C, aproximadamente e estabilizada; b) um corpo de prova, contendo uma das amostras, com o termopar já instalado no orifício central e devidamente conectado às câmaras trocadoras de calor; c) uma mangueira de silicone conectando a saída da água circulante do banho térmico com o tubo de vidro em forma de “Y” e deste com as entradas das câmaras; d) uma mangueira de silicone conectando a entrada da água circulante no banho térmico a um tubo de vidro em forma de “Y” e deste com as saídas das câmaras trocadoras de calor; e) dois termopares introduzidos nas mangueiras imediatamente antes das entradas da água nas câmaras e dois outros nas mangueiras de saída da água das câmaras; e f) foram registradas, em planilha previamente preparadas, a temperatura da amostra (temperatura inicial –  $T_i$ ), temperatura da água do banho e demais dados referentes à data, horário e identificação da amostra em teste.

Uma vez aberto a torneira do banho térmico, a água começava imediatamente a circular pelo sistema e o tempo começava a ser contado quando a água iniciava a saída das câmaras trocadoras de calor, indicando, de forma segura, que as mesmas já se encontravam completamente inundadas. Neste instante, registrava-se as leituras das temperaturas medidas pelos termopares inseridos nas entradas e nas saídas das câmaras trocadoras de calor.

Para cada uma das seqüências de aquisição de valores para o termopar inserido na amostra, as leituras das temperaturas foram realizadas em intervalos regulares de 1 minuto e a cada três minutos para as leituras dos outros quatro termopares (um em cada mangueira da entrada e um em cada mangueira da saída das câmaras), usando-se um cronômetro mecânico para registrar ao tempos. Cada seqüência de aquisição de dados de temperaturas teve a duração de 30 minutos.

Imediatamente após cada uma dessas seqüência, foi medida a massa úmida das amostras e, em seguida, as mesmas eram levadas à estufa, na temperatura de 105 °C, por 48 horas. Após esse intervalo de tempo, considerado suficiente para que a água contida na amostra evaporasse completamente, a massa seca foi medida. Com esses dados foi possível a determinação da umidade e da densidade das amostras.

#### **4.4 – Erros experimentais.**

A todo resultado experimental sempre estará associado um conjunto de erros experimentais, de diversos tipos, inerentes ao processo de medida e de leitura dos instrumentos, por melhores que sejam eles. Desta forma, o valor de qualquer grandeza física determinada experimentalmente, estará associado a uma incerteza.

##### **4.4.1 – Tipos de erros**

Segundo VUOLO (1992), os erros experimentais podem ser classificados em três grupos: erros grosseiros, erros acidentais e erros sistemáticos.

Os erros grosseiros são aqueles que podem ser cometidos pelo operador tanto no processo de medida quanto na realização de cálculos. Tais erros não devem ocorrer ao longo de um experimento e deve-se procurar sempre eliminá-los.

Os erros acidentais ocorrem quando não se pode ter o total controle dos processos de medida. Incluem-se nessa categoria os erros que se cometem, por exemplo, quando o instrumento apresenta a temperatura com leitura flutuante ou quando ocorre uma falha acidental no funcionamento de um dado equipamento.

No presente trabalho esse tipo de erro foi minimizado com: a) um exame minucioso do funcionamento de todo o equipamento por ocasião da sua montagem e antes de se iniciar cada seqüência de aquisição de dados de temperatura. Durante cada uma dessas seqüências de aquisição de dados as leituras de temperatura foram tomadas criteriosamente, anotando-se o valor mostrado no display do indicador digital de temperatura. Quando as indicações oscilavam entre dois valores foi sempre escolhido o menor deles e quando a oscilação ocorria entre três valores foi tomado o valor intermediário. No caso das medidas do tempo, o erro acidental foi minimizado em razão das mesmas terem sido tomadas em intervalos regulares de 1 minuto, suficientemente longo para que o seu controle se tornasse bastante fácil.

Os erros sistemáticos podem ocorrer por diversos motivos mas, via de regra, são erros instrumentais, devido à calibração dos instrumentos, erros teóricos, erros devido às aproximações feitas no uso de fórmulas ou em valores de constantes físicas e erros de observação.

#### **4.4.2 – Erros sistemáticos das medidas realizadas**

Qualquer medida realizada mediante um instrumento apresenta um resultado que é afetado por um erro sistemático, denominado erro de calibração. Se o fabricante do instrumento fornecer manual com informações sobre o uso adequado do mesmo e com especificações técnicas sobre a sua capacidade operacional e suas limitações, o usuário poderia, desde o início, estimar o grau de confiança em medidas fornecidas pelo instrumento, a partir do nível de erro sistemático informado. Quando isto não ocorre e, admitindo-se que não existam outros erros sistemáticos significativos, pode-se assumir como regra geral, que o erro de calibração seja igual à metade da menor divisão da escala do instrumento.

A partir dessas considerações, foram admitidos os seguintes erros de calibração para os instrumentos utilizados nas seqüências de aquisição de dados de temperatura em função do tempo:

*Calibração de termopares:* para medir a temperatura do banho térmico quando do processo de calibração dos termopares, foi usado um termômetro de precisão cuja menor divisão é de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para visualizar a posição da coluna de mercúrio no termômetro foi usada uma lupa. Em razão desses cuidados o erro mínimo cometido pela utilização dos termopares foi de  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Leitura das indicações de temperatura:* o indicador digital de temperatura permitiu leituras de décimos de grau. Durante uma seqüência de tomadas de leituras, o indicador apresentou flutuações de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Considerou-se, portanto, o erro de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , cometido no valor final de cada leitura fornecida pelo indicador.

*Localização dos termopares:* para marcar a posição de inserção do termopar usado na aquisição de dados de temperatura da amostra, foi usado um paquímetro graduado em milímetros, com nônio de 10 divisões. A menor leitura que pode ser efetuada com esse instrumento é de 1 mm e, assim, considerou-se um erro mínimo de 0,5 mm para a localização do termopar da amostra.

*Tempo:* para a medição do tempo utilizou-se um cronômetro analógico em que a menor leitura é de 1 s, admitindo-se um valor de 0,5 s como erro mínimo de calibração. Os valores das temperaturas, medidas pelo termopar inserido na amostra, foi tomado com intervalos regulares de 1 minuto. Os valores das temperaturas proporcionados pelos termopares inseridos nas mangueiras de circulação da água do banho, em posições imediatamente antes das entradas e imediatamente após as saídas das câmaras trocadoras de calor, foram coletados com intervalos de três minutos. Nesses instantes, foram lidas cinco indicações de temperatura e o tempo gasto com o acionamento das cinco teclas do indicador bem como o registro dessas temperaturas foi de aproximadamente 10 segundos. O erro mínimo cometido por admitir que tais leituras foram simultâneas ficou reduzido em razão da

duração total de uma seqüência de aquisição de dados de temperatura que foi de 30 minutos (1800 s) em relação ao tempo total gasto com as leituras e registros das mesmas (100 s). Tal erro mínimo foi estimado, portanto, em 0,06 s.

## **4.5 – Resultados experimentais**

### **4.5.1 – Apresentação e comentários dos valores de temperaturas obtidos**

As temperaturas coletadas pelos termopares inseridos nas mangueiras de circulação de água, foram lidas a cada três minutos como forma de se manter o controle da temperatura de cada câmara trocadora de calor, durante uma seqüência de aquisição de dados. A diferença entre as temperaturas corrigidas da água circulante, medidas pelos termopares inseridos nas duas mangueiras de entrada da água, sempre foi nula, indicando igualdade de temperatura da água na entrada das câmaras. O mesmo fato foi verificado com as temperaturas corrigidas da água nas saídas das câmaras. A diferença máxima registrada entre as temperaturas da água circulante nas entradas e nas saídas das câmaras trocadoras nunca excedeu a 0,6 °C, indicando que as perdas de calor para o ambiente foram mínimas e, ao mesmo tempo, permitindo-se estimar a temperatura da água circulante no interior de cada câmara como a média entre elas.

As temperaturas coletadas pelo termopar inserido no centro do corpo de prova contendo uma determinada amostra, foram lidas em intervalos regulares de um minuto e registradas, em seguida, numa planilha apropriada. O tempo total de cada seqüência de aquisição de dados foi de 30 minutos.

Foram reunidos num mesmo gráfico – figura 4.8 - os dados de temperatura contra tempo para as seis amostras secas ao ar, cujas umidades gravimétricas eram muito próximas entre si, exceto a umidade do resíduo. Também foram reunidos num mesmo gráfico – figura 4.9 - as amostras que sofreram o outro tratamento, ou seja, saturação seguida de secagem em estufa, para que as suas umidades gravimétricas se situassem em patamares maiores, em torno de 0,43 g/g. Novamente a exceção foi o resíduo puro. Embora tivesse sido

tratado e preparado exatamente da mesma forma e nas mesmas condições que as do solo, sua umidade mostrou-se muito maior que a do solo de referência, em ambos os casos, indicando mais uma vez, provavelmente, sua alta capacidade de absorção de água. As figuras 4.8 e 4.9, a seguir, exibem tais dados.

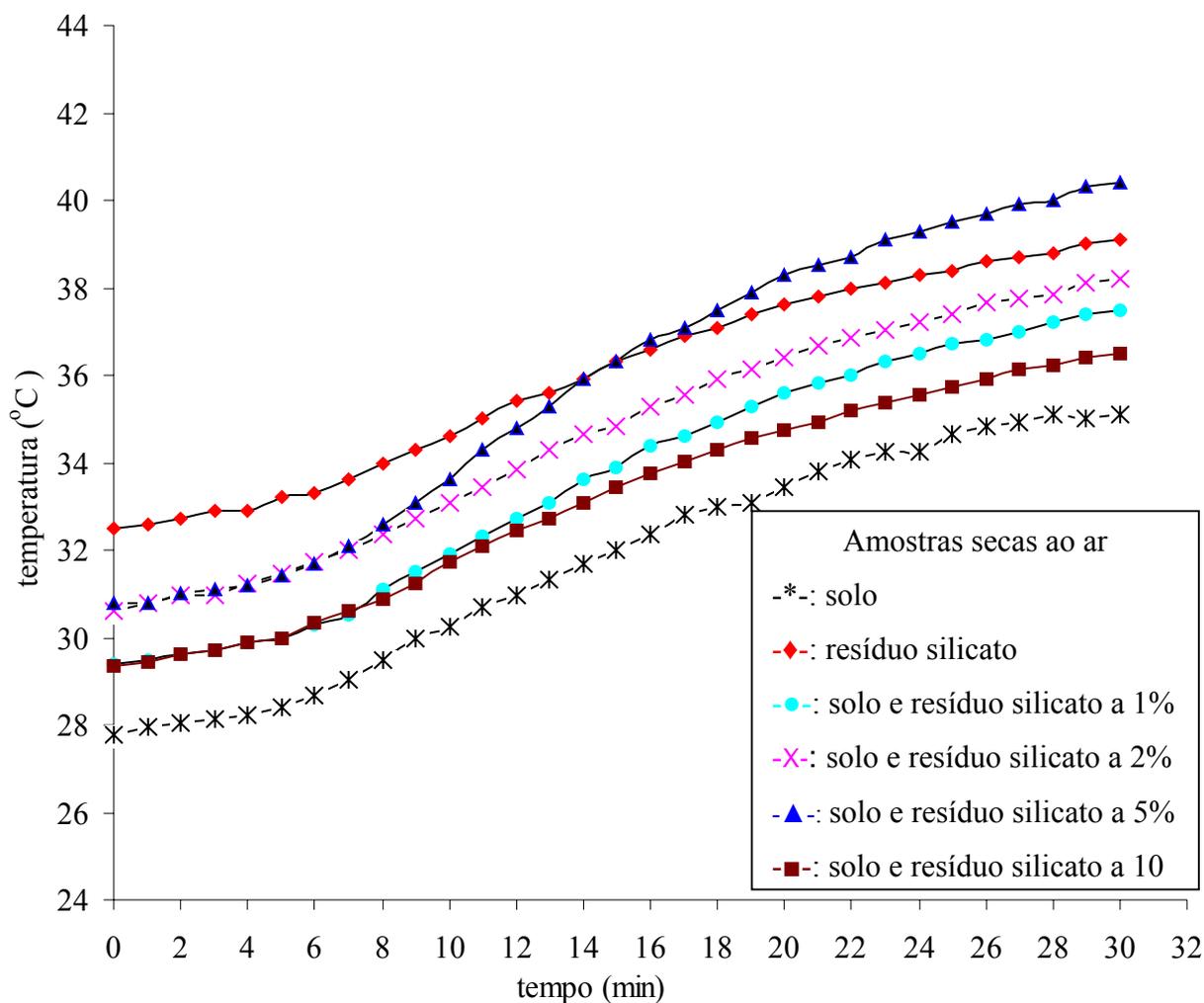


Fig. 4.8 – Valores de temperatura contra o tempo, medidas no centro do corpo de prova para as amostras secas ao ar.

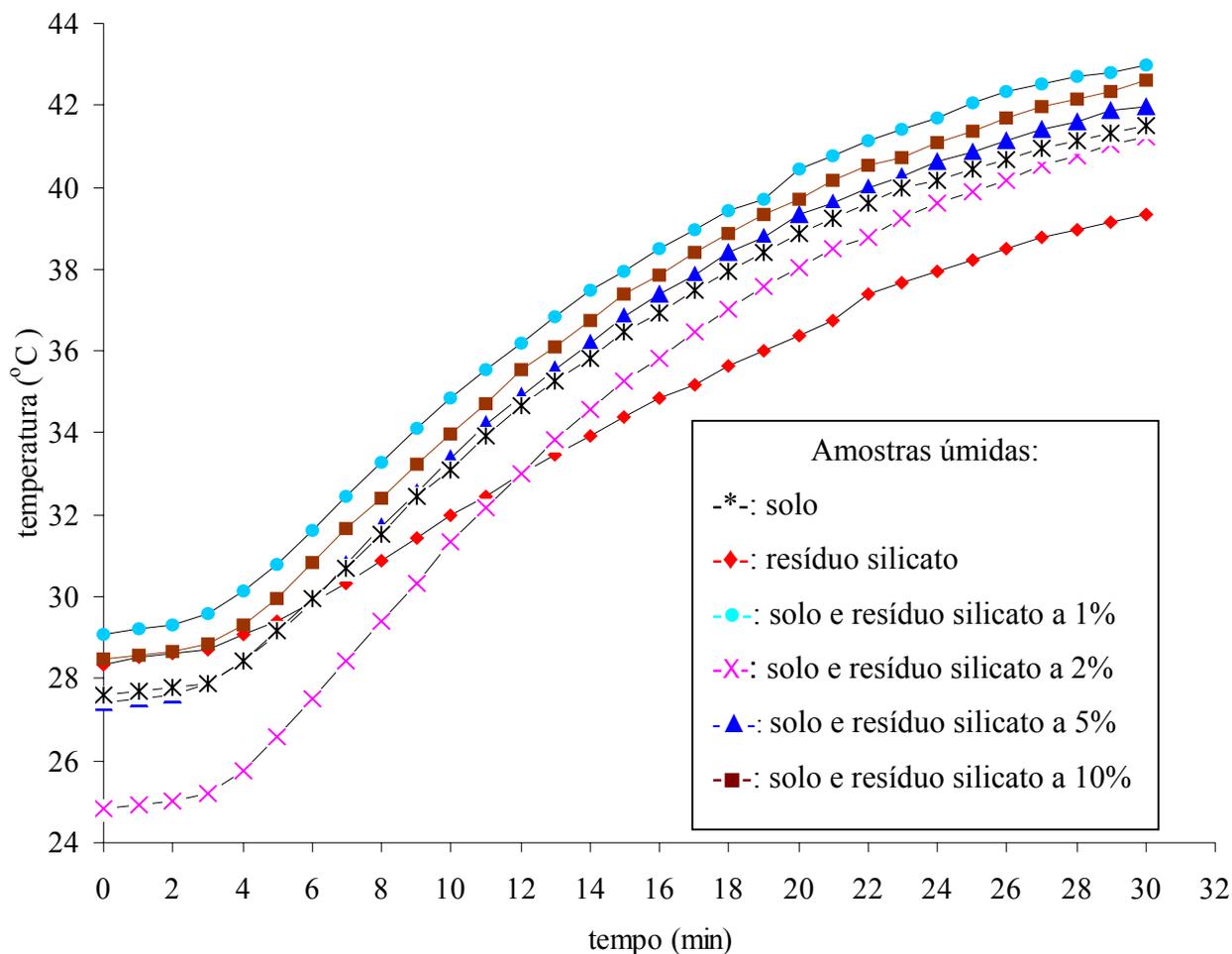


Fig. 4.9 - Valores de temperatura contra o tempo, medidas no centro do corpo de prova para as amostras processadas para umidades gravimétricas maiores que 0,42 g/g.

Observa-se da figura 4.8, que as linhas reunindo os valores de temperatura das amostras de solo e de solo incorporado com resíduo, apresentam um comportamento gráfico que se assemelha àquele exibido pelo solo de referência. As únicas possíveis exceções recaem sobre as amostras de solo com 1% de resíduo e de solo com 5% de resíduo, que apresentam diferenças entre as temperaturas final e inicial maiores que a mesma diferença observada para o solo. Tais resultados poderiam ser explicados com o apoio da literatura seguinte, na qual se afirma que as propriedades físicas do solo dependem essencialmente da

textura, caracterizada pela análise granulométrica do tamanho dos grãos e pela percentagem de ocorrência de partículas de tamanhos; da estrutura, que descreve o arranjo, a orientação e a organização dos espaços porosos diversos (HADAS, 1977 e REICHARDT, 1996) e da umidade (JACKSON & KIRKHAM, 1958; KIRKHAM & POWERS, 1972; JURY et al, 1991). Os resultados observados sugeririam que a amostra com a percentagem de 1 % de resíduo em solo, nas condições de pequeno valor de umidade, constitui-se num meio poroso com propriedades térmicas levemente diferentes das demais amostras no que se refere à sua textura ou estrutura e que a amostra com a percentagem de 5 % de resíduo em solo comportou-se ligeiramente diferente do que a do solo, em razão de sua umidade ser quase que três vezes maior que a deste.

Uma análise dos gráficos da figura 4.9 permite observar que os valores de temperatura das amostra de solo e de solo incorporado com resíduo, também mostraram comportamentos bastante semelhantes. Neste caso, porém, a amostra de resíduo puro exibiu comportamento diferenciado em relação às demais, provavelmente em razão da sua grande capacidade de absorver água. Conforme a legenda da figura, a umidade gravimétrica do resíduo é muito maior do que as umidades das demais amostras. A literatura citada abaixo, prevê que, para elevados valores de umidade, o aumento da capacidade térmica do meio poroso é um fator que limita o transporte de energia através dele. Com a água ocupando grande parte dos espaços porosos aumenta-se a retenção de energia com a conseqüente diminuição do seu fluxo (AL NAKSHABAND & KOHNKE e SEPASKHAH & BOERSMA, 1979).

#### **4.6 – Cálculo da difusividade térmica**

A equação (3.17), que é a solução da equação diferencial parcial que rege a a densidade de fluxo de calor no solo em regime transitório, é uma equação que pode ser reconhecida como uma expansão em série de Fourier, obtida com a imposição das condições inicial e de contorno, conforme descrito anteriormente. Tal equação permite calcular a

difusividade térmica em qualquer ponto da amostra bastando, para isso, que se tome o valor da temperatura em cada instante.

Entretanto, o valor da difusividade em cada instante não pode ser diretamente explicitado a partir da equação (3.17) e, para que se pudesse obter seu valor, desenvolveu-se de um programa computacional em linguagem BASIC, que é apresentado no anexo I. Foi usado o seguinte procedimento:

- com os valores de temperatura obtidos em  $x = L/2$  (centro da amostra), empregou-se a equação 3.18 para se obter um valor aproximado para a difusividade em cada instante. O valor é aproximado pois a equação 3.18 explicita a difusividade para  $n = 1$ ;

- com os valores de  $T_i$ ,  $T_1$  e  $T_{L/2}$ , os valores do primeiro membro da equação (3.17) foi calculado para cada instante;

- para o cálculo do segundo membro da equação (3.17) o programa computacional, a partir do valor da difusividade aproximada (para  $n = 1$ ), procurou ajustá-lo ao valor do primeiro membro usando  $n = 100$  termos, até que o erro entre tais valores se situasse em torno de 0,5 %. Esse foi o erro máximo de procedimento (erro de rotina) que foi imposto ao processo.

Todos os valores para a difusividade térmica obtidos com o emprego desse procedimento são apresentados no anexo II.

As figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, apresentadas a seguir, mostram os valores da difusividade térmica como função do tempo para quatro amostras. Em todas elas foram exibidos os valores de difusividade térmica em cada instante de observação para as amostras de solo em duas umidades - seco ao ar e úmido - juntamente com outras duas amostras com as mesmas percentagens de resíduo, também nas duas umidade correspondentes às do solo. Este procedimento visa o estabelecimento de comparações entre as difusividades térmicas de todas as amostras, tendo-se como referência as difusividades térmicas do solo.

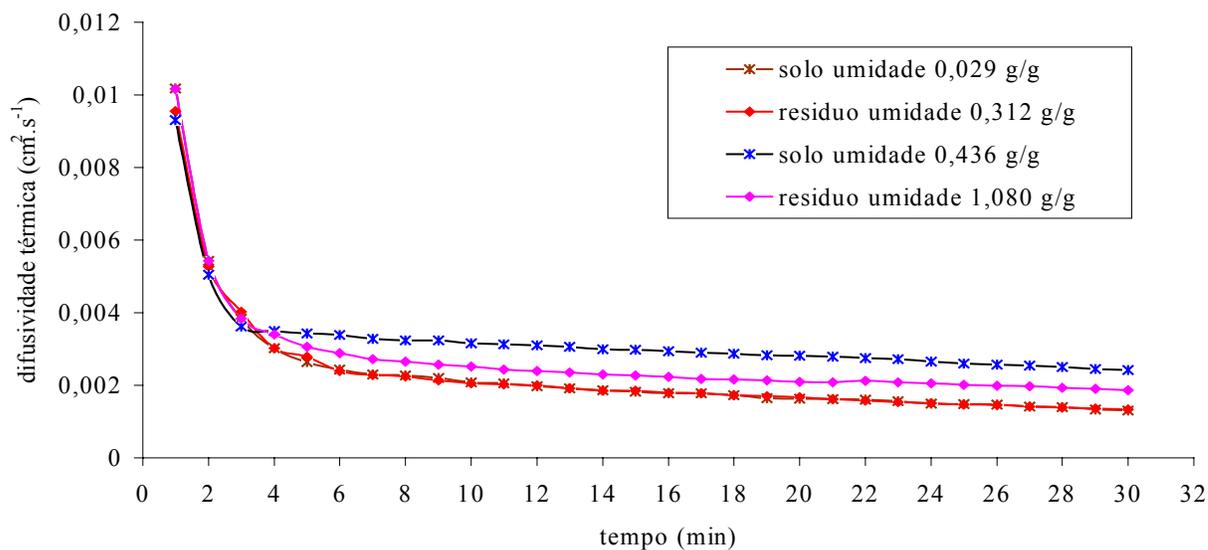


Fig. 4.10 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de resíduo puro (100%), em função do tempo.

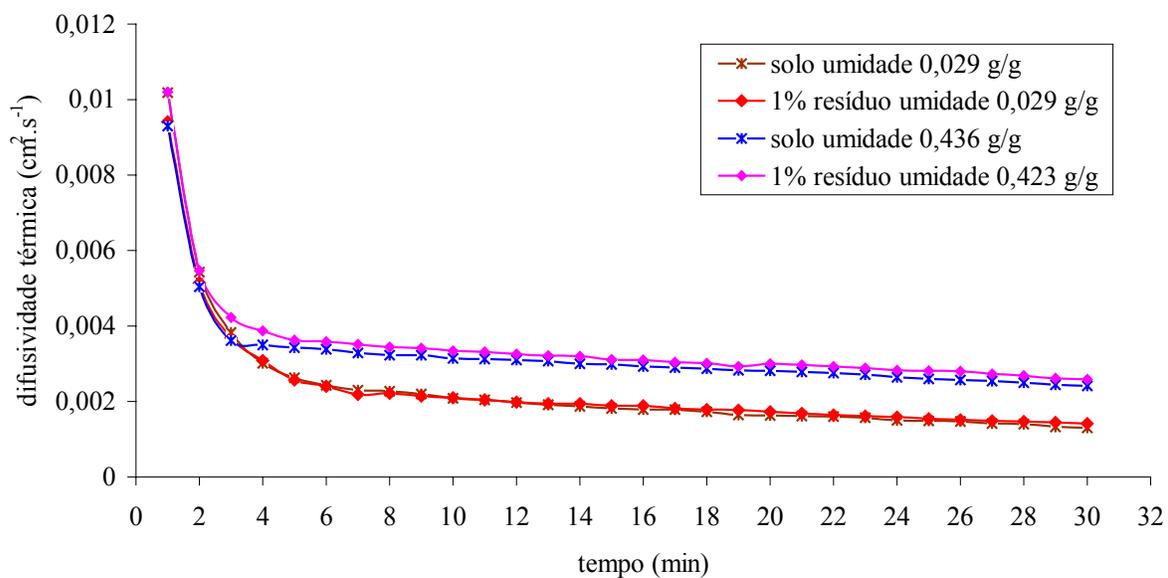


Fig. 4.11 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 1%, em função do tempo.

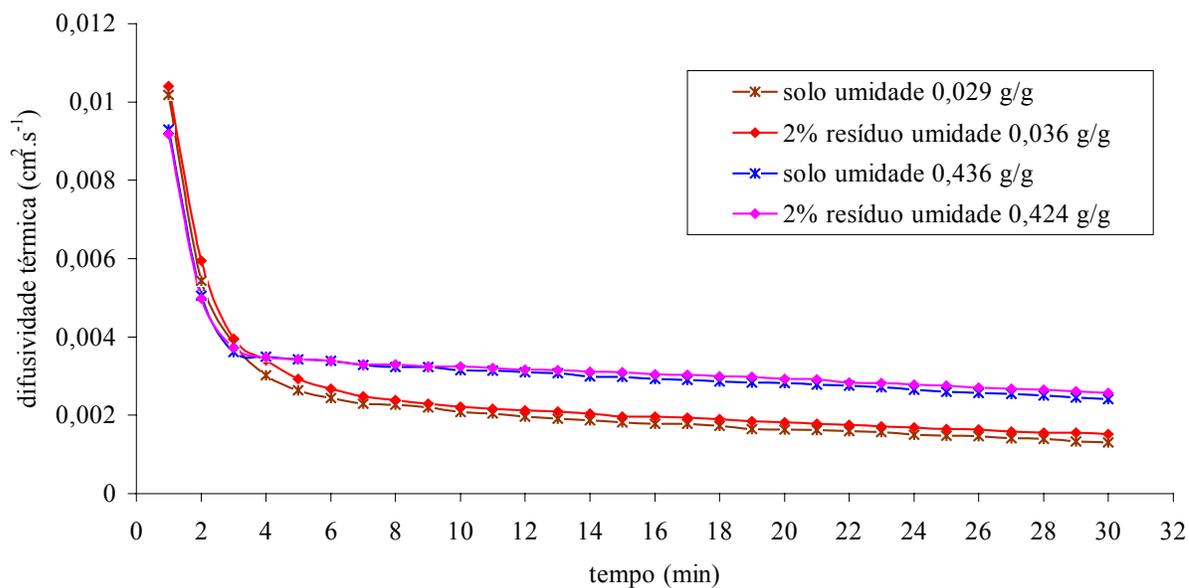


Fig. 4.12 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 2%, em função do tempo.

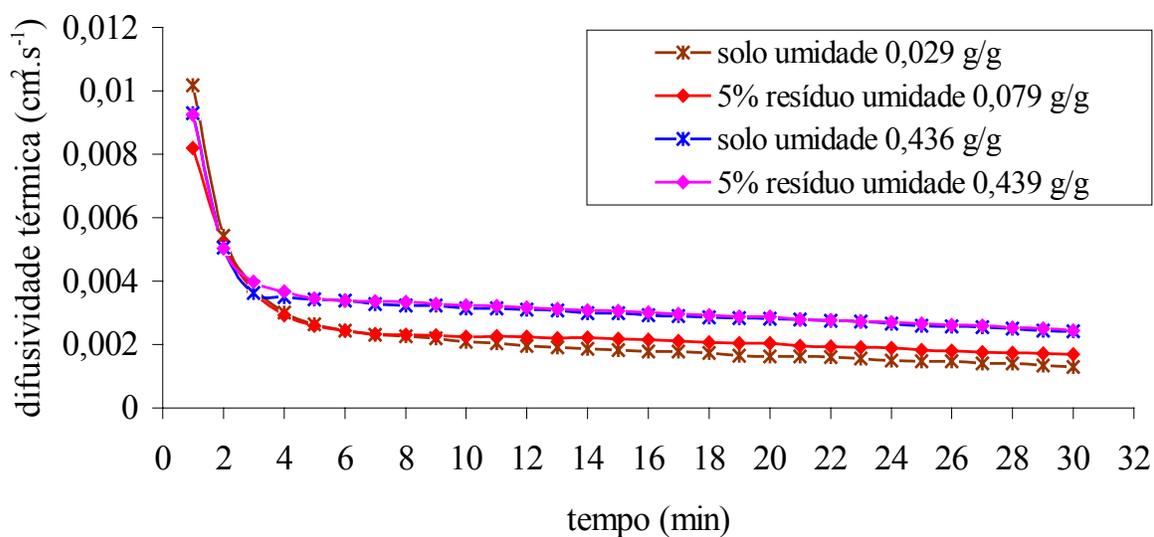


Fig. 4.13 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 5%, em função do tempo.

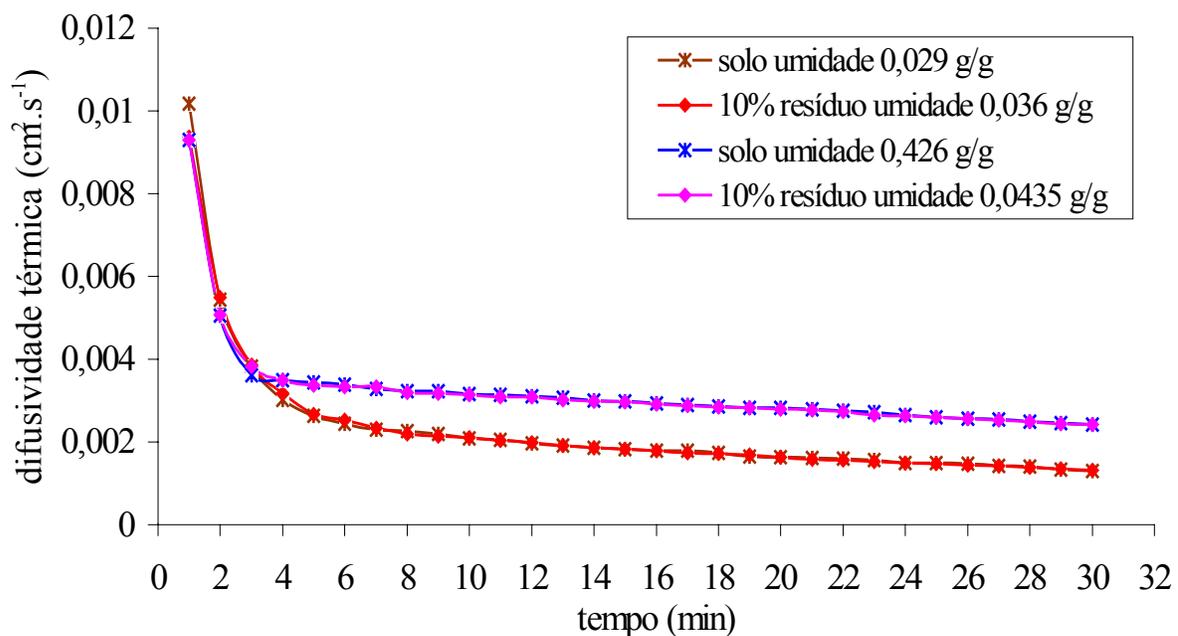


Fig. 4.14 – Valores da difusividade térmica das amostras de solo e das amostras de solo incorporado com resíduo a 10%, em função do tempo.

Os gráficos mostrados nas figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 revelam que para todas as amostras secas ao ar (umidades gravimétricas entre 0,029 g/g e 0,079 g/g, exceto o resíduo puro que é de 0,312 g/g) apresentam valores de difusividades térmicas menores que todas as amostras que sofreram o tratamento de saturação seguido de secagem em estufa. Este fato pode ter respaldo na literatura onde CAMPBELL, et al (1971) afirmam que o aumento da umidade do solo (particularmente quando de 22% a 35% do espaço poroso é ocupado por água) provoca aumento da condutividade térmica (que pode atingir valores máximos nestas condições) e, assim, faz com que a difusividade térmica sofra, também, um aumento.

Em todas as figuras pode-se notar que os valores da difusividade térmica nos instantes iniciais são significativamente maiores que os valores apresentados para os instantes finais de observação. Tal fato pode estar associado ao problema de acoplamento provocado pelo fenômeno da dessecação parcial da amostra. Nos instantes iniciais de cada seqüência de tomada de temperaturas, a porção da amostra em contato com o disco de cobre sofre um súbito

aumento de temperatura quando a água inunda a câmara trocadora de calor. A água contida na amostra é parcialmente evaporada e, assim, por alguns instantes, ocorre transporte de calor por condução e por convecção, isto é, também por transporte de massa.

A tabela 4.2 a seguir, mostra os valores das difusividades térmicas médias de todas as amostras levando-se em conta todos os valores medidos, inclusive àqueles dos instantes iniciais e, também, os valores das difusividades térmicas médias de todas as amostras para os quais foram desprezados os três valores iniciais, isto é, aqueles medidos para os três primeiros instantes de observação.

Tab. 4.2 – Difusividade térmica média de todas as amostras

M.T = média total dos 30 valores medidos

M.P. = média parcial dos 27 últimos valores medidos

AMOSTRAS	VALORES DA DIFUSIVIDADE $\cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
	M.T.	M.P.
solo seco ao ar - $\theta_g = 0,029 \text{ g/g}$	2,31	1,85
resíduo seco ao ar - $\theta_g = 0,312 \text{ g/g}$	2,29	1,85
solo e resíduo a 1% seco ao ar - $\theta_g = 0,029 \text{ g/g}$	2,31	1,89
solo e resíduo a 2% seco ao ar - $\theta_g = 0,036 \text{ g/g}$	2,50	2,03
solo e resíduo a 5% seco ao ar - $\theta_g = 0,079 \text{ g/g}$	2,46	2,11
solo e resíduo a 10% seco ao ar - $\theta_g = 0,036 \text{ g/g}$	2,29	1,85
solo úmido - $\theta_g = 0,436 \text{ g/g}$	3,23	2,92
resíduo úmido - $\theta_g = 1,080 \text{ g/g}$	2,73	2,31
solo e resíduo a 1% úmido - $\theta_g = 0,423 \text{ g/g}$	3,46	3,11
solo e resíduo a 2% úmido - $\theta_g = 0,424 \text{ g/g}$	3,31	3,02
solo e resíduo a 5% úmido - $\theta_g = 0,439 \text{ g/g}$	3,29	2,98
solo e resíduo a 10% úmido - $\theta_g = 0,435 \text{ g/g}$	3,22	2,90

Os valores médios da difusividade térmica para todas as amostras secas ao ar, considerando-se todos os 30 instantes de observação, diferem muito pouco entre si, situando-se entre  $2,29 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $2,50 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Excetuando-se o resíduo, todas as demais amostras que passaram pelo processo de saturação seguido de secagem em estufa (amostras úmidas) também apresentam valores médios de difusividade térmica muito próximos entre si, situando-se na faixa de  $3,22 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $3,46 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , quando se leva em conta todos os 30 instantes de observação.

Essa diferença entre as faixas de valores para amostras secas ao ar e as amostras úmidas era prevista pela literatura, conforme já citado anteriormente. O comportamento do resíduo úmido, cuja umidade é superior a 100% em massa, também não causa estranheza pois, para esses valores de umidade, com a água ocupando a maior parte dos espaços porosos, a capacidade térmica é muito grande provocando diminuição da difusividade térmica do resíduo.

As difusividades térmicas médias parciais obtidas com os 27 últimos valores para todas as amostras apresentam, em relação àquelas chamadas de médias totais, diferença mínima de 8,76% e máxima de 19,9%. Esses resultados (médias parciais) podem indicar valores médios das difusividades térmicas mais próximos dos valores reais, uma vez que, para o seu cálculo, considerou-se em conta apenas o processo de transferência de calor por condução, em regime transitório, uma vez que desprezou-se aqueles obtidos no intervalo de tempo em que durou o processo de acoplamento.

Os valores médios de difusividade térmica para o solo, apresentados na tabela 4.2, são muito próximos àqueles determinados por CLIVATI (1991) para um solo semelhante. Tal fato permite admitir que existe uma boa concordância entre os resultados obtidos com aqueles constantes na literatura e, portanto, atribuir um bom grau de confiança nos experimentos ora realizados.

As figuras a seguir mostram uma outra possibilidade de obtenção das difusividades em cada instante de tempo observado, para quatro amostras.

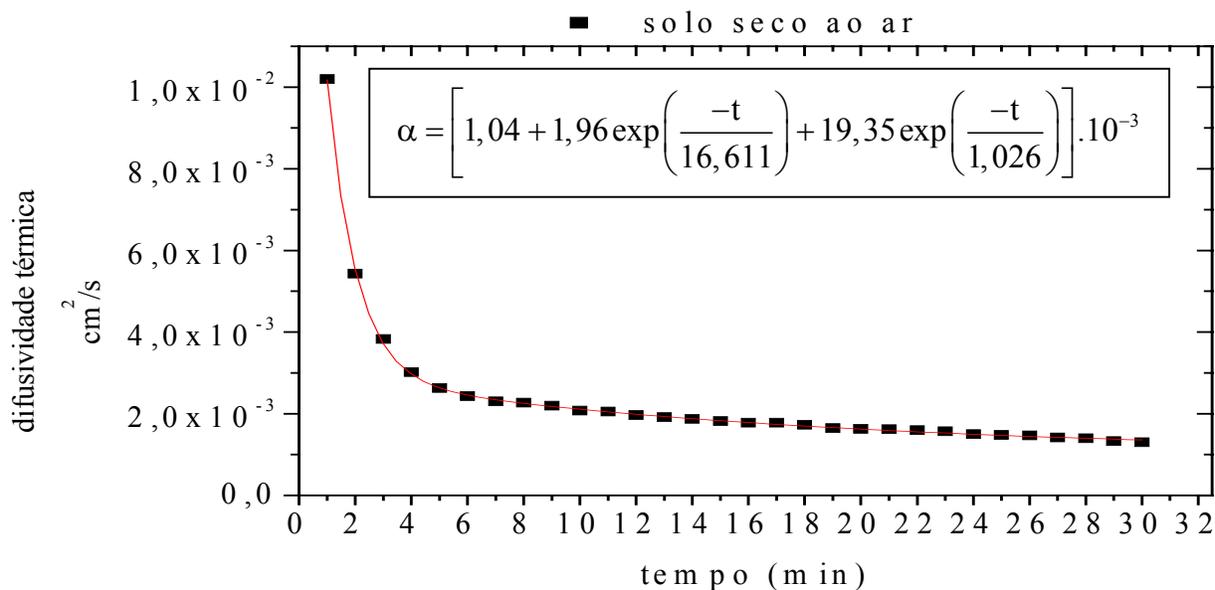


Fig. 4.15 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo seco ao ar em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito.

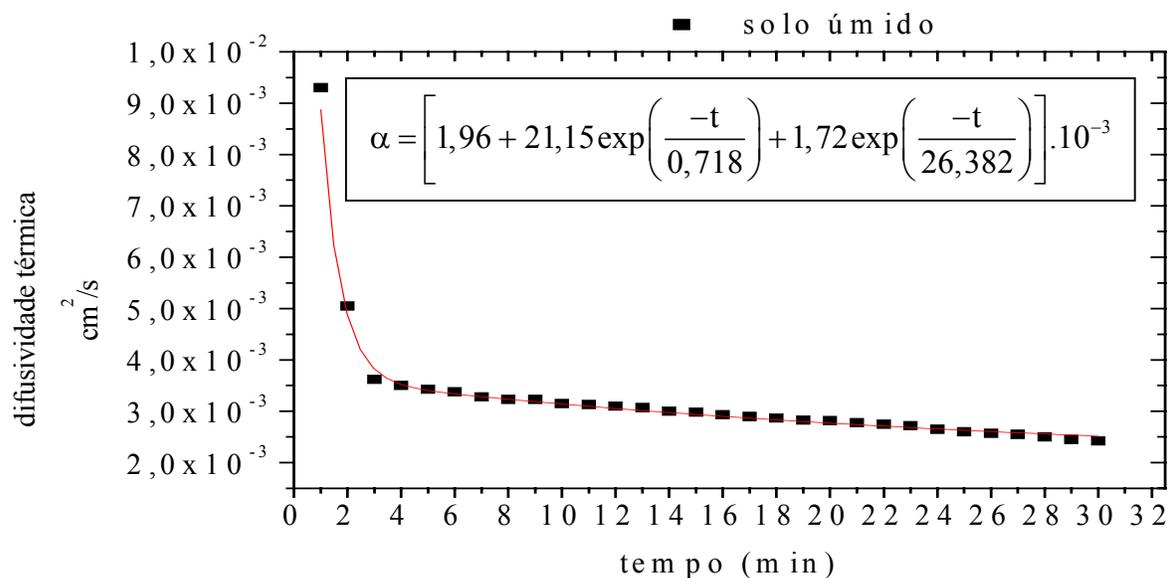


Fig. 4.16 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo úmido em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito.

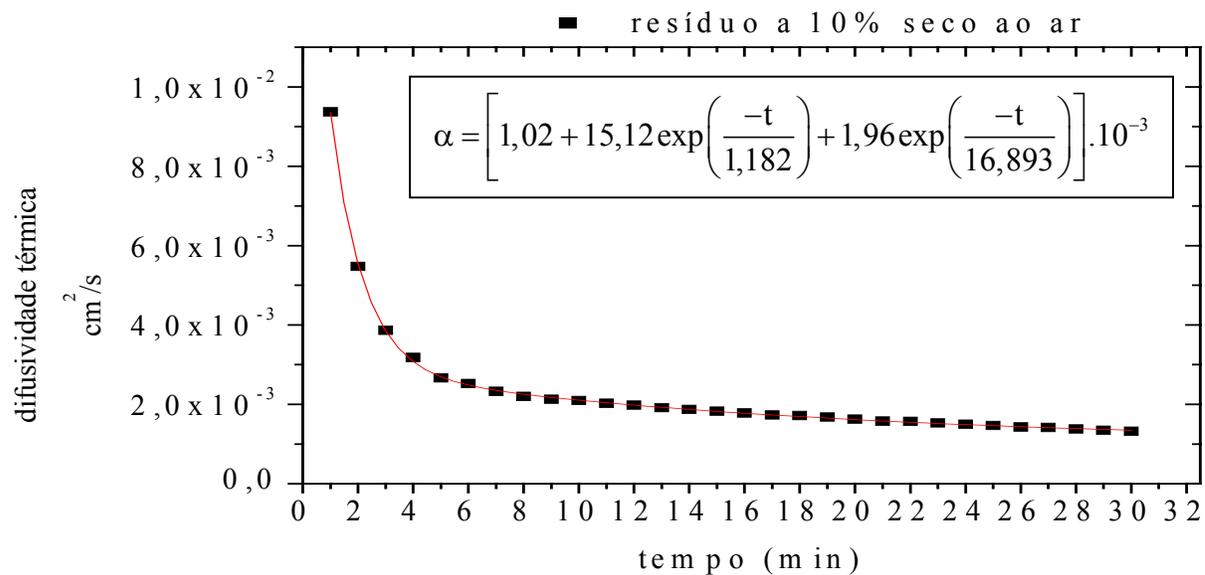


Fig. 4.17 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo com resíduo a 10%, seco ao ar, em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito.

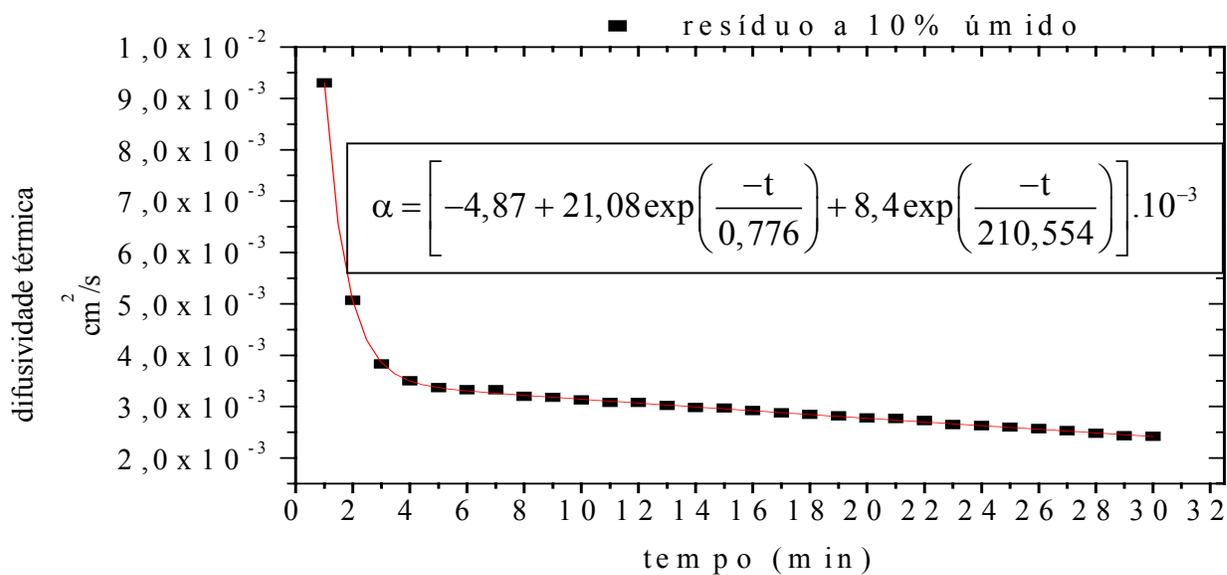


Fig. 4.18 – Valores da difusividade térmica da amostra de solo com resíduo a 10%, úmido, em função do tempo e a equação da função correspondente ao ajuste feito.

As figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 mostram que, a partir dos gráficos de difusividade contra tempo, para as amostras de solo (seco ao ar e úmido) e solo com resíduo incorporado na proporção de 10% (também seco ao ar e úmido), foram obtidas as linhas de tendência e, assim, as equações para essas curvas. A finalidade dessas equações está na possibilidade de se obter os valores da difusividade térmica com o seu emprego direto. Trata-se de uma modelagem matemática para cada uma dessas amostras.

#### 4.7 – Análise da equação usada para a determinação da difusividade térmica.

A figura 4.19 mostra os valores da difusividade térmica para a amostra de solo seco ao ar, calculadas por meio da equação (3.17) com  $n = 100$  e por meio da equação (3.18), isto é, a equação (3.17) na qual se fez  $n = 1$ .

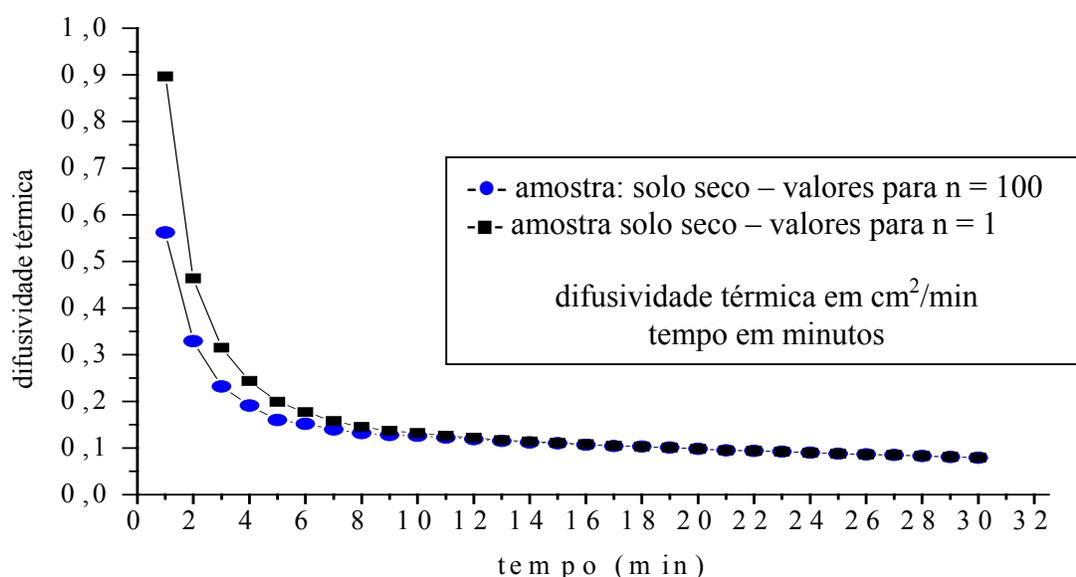


Fig. 4.19 – Valores de difusividade térmica para uma amostra de solo seco ao ar, obtidos por meio da eq. (3.17), com  $n = 100$ , e por meio da eq. (3.18).

Quando se emprega a equação (3.17) com  $n = 100$ , os valores da difusividade térmica para cada instante de observação somente podem ser obtidos, como já foi

mencionado, com o auxílio de um programa computacional que efetue a soma de todos os termos da série. Na figura 4.19 comparam-se os valores da difusividade térmica assim obtidos, com aqueles que poderiam ser calculados com  $n = 1$ , conforme a equação (3.18). Evidencia-se, nesta figura, que a convergência entre esses valores ocorre apenas após um intervalo de tempo relativamente grande o que inviabiliza o emprego da equação (3.18) para o cálculo da difusividade térmica das amostras.

# Capítulo 5

## Conclusões e sugestões

### 5.1 – Conclusões

A primeira conclusão se refere, especificamente, aos resultados da pesquisa proposta para se determinar a difusividade térmica de amostras de solo às quais se incorporou o resíduo industrial de silicato. Sob esse aspecto, a finalidade do trabalho consistiu em comparar os valores da difusividade térmica das amostras contendo resíduo com aquelas contendo apenas solo e, assim, verificar para qual ou quais amostras, o valor da difusividade térmica mais se aproximou daqueles obtidos para as amostras de solo.

A segunda conclusão está relacionada com a possibilidade de se descartar o resíduo no solo e em quais proporções de solo-resíduo este descarte poderia ocorrer. Sob este aspecto, esta pesquisa, de certa forma, fecha um ciclo de trabalhos que envolveram o mesmo resíduo industrial. LUCIANO (2000) e MONTAGNOLI DE ALMEIDA (2001) concluíram, respectivamente, que este mesmo resíduo, quando incorporado ao solo, aumenta a retenção de água quando se aumenta a proporção de resíduo no solo (diminui a difusividade hidráulica) e favorece as condições para que ocorra a biodegradação da

matéria orgânica. Estes são dois dos principais fatores condicionantes para o desenvolvimento das plantas.

Esses dois trabalhos, um sobre infiltração de água e o outro sobre a respirometria do solo incorporado com o resíduo, estão sendo, assim, complementados com este, que se refere à transferência de energia no solo, e que é o terceiro fator relacionado com o desenvolvimento das plantas.

### **5.1.1 – Conclusões experimentais**

Os resultados obtidos para as difusividades térmica de todas as amostras, exibidos na seção 4.6, permitem concluir que as amostras de solo contendo resíduo industrial de silicato incorporado, na condição de seco ao ar, ou seja, em umidade mais baixas, apresentam comportamentos semelhante em todas as proporções. Para as amostras que passaram pelo processo de saturação seguido de secagem em estufa, ou seja, em umidades mais elevadas, os valores da difusividade térmica apresentaram pequena diferença, especialmente nas proporções, em massa, de 1% e de 2%, em todos os instantes observados. Tais diferenças, entretanto, não são significativas, como se pode concluir da tabela 4.2.

Conclui-se, portanto, que os valores obtidos para a difusividade térmica de todas as amostras, em todas as proporções testadas, foram muito próximos daqueles obtidos para as amostras de solo, sem que diferenças significativas fossem observadas.

A partir da proposta de se decidir pela incorporação do resíduo ao solo e em quais proporções ela deveria ocorrer, conclui-se que percentagens em torno de 10% de resíduo no solo são as mais indicadas. Esta é uma conclusão parcial pois leva em conta apenas o aspecto da transferência de energia para o solo. O critério estabelecido para esta conclusão está fundamentado em dois fatores:

- 1- Procurou-se a percentagem de resíduo em solo cujos valores de difusividade térmica em cada instante mais se aproximassem com aquelas calculadas para o solo referencial.

2- Na ausência de diferenças significativas entre as amostras de um mesmo grupo, a opção recaiu para a amostra de percentagem mais elevada.

A conclusão final, que se pode inferir a partir das duas anteriores, é que a incorporação do resíduo industrial de silicato, nas proporções testadas, constitui-se num benefício para o solo, no que se refere ao desenvolvimento das plantas, quando se leva em conta este trabalho associado aos outros dois já citados.

## **5.2 – Sugestões para a continuidade do trabalho**

Para a continuidade do trabalho de pesquisa com resíduos de silicato sugere-se sejam utilizadas outras proporções e outros valores de umidade, com o objetivo de verificar o comportamento térmico deste resíduo quando incorporado ao solo em condições de umidade e em proporções diferentes daquelas aqui analisadas.

A literatura pesquisada não revelou trabalhos que determinem as propriedades térmicas de outros resíduos inorgânicos de mesma classe. Portanto, fica também a sugestão para elas sejam realizadas nestas ou em outras condições, visto que o conhecimento de tais propriedades colabora para a tomada de decisão quanto ao descarte dos mesmos no solo.

A pesquisa bibliográfica realizada evidenciou o número reduzido de métodos de determinação das propriedades térmicas e, em particular, métodos de determinação da difusividade térmica de meios porosos como o solo. Dada a grande importância para a agricultura e para as ciências do meio ambiente, sugere-se que outros métodos de determinação das propriedades térmicas do solo, e do solo com resíduos a ele incorporados, sejam propostos.

## Capítulo 6

### Referências bibliográficas

AL NAKSHABANDI, G.; KOHNKE, H. Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. **Agricultural Meteorology**, v. 2, p. 271-279, 1965. Amsterdam.

CAMPBELL, K. O., et al. **Fundamentos de agricultura moderna**. 1er. ed. Barcelona. Talleres gráficos A. Nuñez. 1971

CAMPOS, J.O. Resíduos industriais: um olhar no futuro. in **Manejo de resíduos: pressuposto para a gestão ambiental**. Laboratório de Planejamento Municipal, DEPLAN – IGCE – UNESP, 2002. Rio Claro. 112p.

CHUNG, K.; JACKSON, M.L. Thermal diffusivity of low conductivity materials. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 46, n. 12, p. 2563-2566, December. 1954. Washington.

CLIVATI, A.A. **Método proposto para Determinação da Difusividade Térmica de Meios Porosos**. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná., Curitiba, 1991.

DE VRIES, D. A. Simultaneous transfer of heat moisture in porous media. **Transaction, America Geophysical Union**, v. 39, n. 5, p. 909-916, 1958. Washington.

DE VRIES, D.A.; PECK, A.J. On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils. II. Analysis of moisture effects. **Australian Journal Physics.**, v. 11 (3), 1958b (in press). Melbourne.

DE VRIES, D.A.; PECK, A.J. On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soil I. **Australian Journal Physics**, 1957. Melbourne.

DERISIO, J.C. **Introdução ao Controle da Poluição Ambiental**. São Paulo: CETESB. 1992.

GOLOVANOV, A.I. Measuring thermal conductivity of soils under laboratory conditions. **Netherlands Journal Agriculture Science**, v. 17, p. 71-79, 1969. Wageningen.

HADAS, A. A comparison between two methods of determining the thermal diffusivity of a moist soil. **Soil Science Society Proceedings**, v. 32, p. 28-30, 1968. Madison.

HADAS, A. Problems involved in measuring the soil thermal conductivity and diffusivity in a moist soil. **Agricultural Meteorology**, v. 13, p. 105-113, 1974. Amsterdam.

HADAS, A. Evaluation of theoretically predict thermal conductivities of soils under field and laboratory conditions. **Soil Science Society American Journal**, v. 41, p. 460-466, 1977. Madison.

HADAS, A. Heat Transfer in Dry Aggregated Soil: I Heat conduction, **Soil Science Society American Journal**, v. 41, p. 1055-1059, 1977b. Madison.

JACKSON, R.D.; KIRKHAN, D. Method of measurement of real thermal diffusivity of moist sol. **Soil Science Society of America (Proceedings)**, v. 22, n. 6, p. 479-482, 1958. Madison.

JONES, H.E.; KOHNKE, H. The influence of soil moisture tension on vapor movement of soil water. **Proceedings/Soil Science Society of America**, Madison, v. 16, p. 245-248, 1952. Madison.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. 5 th ed. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1991. p. 328.

KIRKHAM, D.; POWERS, W.L. **Advanced Soil Physics**. New York: Wiley – Interscience, 1972.

LUCIANO, E.A. **Infiltração de água em três latossolos tratados com resíduo industrial de silicatos**. 2000. 57 f. Tese (Doutorado em Conservação e Manejo de Recursos) – Centro de Estudos Ambientais, UNESP, Rio Claro, 2000.

MONTAGNOLI DE ALMEIDA, S.D. **Respirômetro de Bartha & Pramer para avaliar a produção de CO<sub>2</sub> do solo impactado por resíduo de indústria processadora de sílica-gel e de vinhaça de destilaria de etanol**. 2001. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2001.

ÖZİŞİK, M.N. **Heat Conduction**. New York: John Wiley & Sons, 1980.

PARIKH, R.J.; HAVENS, J.A.; SCOTT, H.D. Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media. **Soil Science Society American Journal**, v. 43, p. 1050-1052, 1979. Madison.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-Discovery, 1996, 446 p.

REICHARD, K. **Dinâmica da Matéria e da Energia em Ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1996, 505 p.

SEPASKHAH, A.R.; BOERSMA, L. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. **Soil Science Society American Journal**, v. 43, p. 439-444, 1979. Madison.

VAN WIJK, W.R.; BRUIJN, P.J. Determination of thermal conductivity and volumetric heat capacity of soils near the surface. **Soil Science Society Proceedings**, p. 461-464, 1964. Madison.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. São Paulo. Edgar Blücher. 1992

WOODSIDE, W. Calculation the thermal conductivity of porous media. **Canadian Journal of Physics**, v. 36, p. 815-823, 1958. Ottawa.

## **Anexo 1**

**Programa em linguagem BASIC para cálculo da difusividade térmica**

```

100   L = 6
150   REM PROGRAMA PARA CALCULAR A DIFUSIVIDADE TÉRMICA
200   DIM TL/2(30), T(30), DIFU(30), DIFN1(30)
300   ERRO = 0,005
400   DELTA = 0,001
500   PI = 3.141516
600   CLS
700   INPUT "NOME DO ARQUIVO ENTRADA DE DADOS", NOME1$
800   INPUT "NOME DO ARQUIVO SAÍDA DE DADOS", NOME$
900   OPEN NOME$ FOR OUTPUT AS #3
1000  OPEN NOME1$ FOR INPUT AS #2
1100  INPUT #2, IDENT$
1200  INPUT #2, TI1, TE1
1300  TI = 0,9159*TI1 + 2,5778
1400  TE = 0,9181*TE1 + 2,3095
1500  FOR K =1 1 TO 30
1600  INPUT #2, TL, T(K)
1700  TL/2(K) = 0,9159*TL + 2,5778
1800  LE = (TL/2(K) - TE)/(TI - TE)
1900  D1 = ((L/PI)^2)/T(K))*LOG(4/PI*LE)
2000  D = D1
2100  N = 100
2200  PRINT
2300  J = 2
2400  S = 0
2500  FOR I =1 TO N STEP 2
2600  X = -D*T(K)*(I*PI/L)^2
2700  S = S + (4/(PI*I))*((-1)^J)*EXP(X)
2800  J = J + 1
2900  NEXT I
3000  LD = S
3100  IF ABS(LE - LD) < ERRO THEN GOTO 3600
3200  D = D - DELTA
3300  IF D > 0 THEN GOTO 3500
3400  PRINT "D < 0.0 PARA TL/2 = ", TL/2(K), " E ", T(K)
3500  GOTO 2300
3600  DIFU(K) = D
3700  DIFN1(K) = D1
3800  NEXT K
3900  PRINT #3, IDENT$

```

```
4000   FOR K =1 TO 30
4100   PRINT #3, TL/2(K), T(K), DIFU(K), DIFN1(K)
4200   NEXT K
4300   PRINT " "
4400   INPUT "ENTRAR COM DADOS DE OUTRA AMOSTRA? S/N ", SN$
4500   IF SN$ = "N" THEN GOTO 4800
4600   CLOSE #3
4700   GOTO 600
4800   CLOSE #3, #2
```

## **Anexo 2**

### **Resultados experimentais**

Tabela 1 – Valores da massa seca, massa úmida e umidade gravimétrica das amostras.

Amostra	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	$\theta_g$ (g.g <sup>-1</sup> )
solo	77,52	75,31	0,029
solo	105,77	73,68	0,436
resíduo	52,84	40,28	0,312
resíduo	77,51	37,25	1,080
1% de resíduo incorporado ao solo	85,51	83,09	0,029
1% de resíduo incorporado ao solo	11,96	78,69	0,423
2% de resíduo incorporado ao solo	87,38	84,36	0,036
2% de resíduo incorporado ao solo	112,13	78,77	0,424
5% de resíduo incorporado ao solo	89,12	82,63	0,079
5% de resíduo incorporado ao solo	112,66	78,28	0,439
10% de resíduo incorporado ao solo	80,50	77,78	0,036
10% de resíduo incorporado ao solo	110,04	76,67	0,435

Tabela 2 – Valores das temperaturas iniciais,  $T_i$ , e dos extremos,  $T_1$ , das amostras, em duas umidades diferentes.

Amostra	Umidade (g.g <sup>-1</sup> )	$T_i$ (°C)	$T_1$ (°C)
Solo	0,029	27,8	49,9
Solo	0,436	27,6	50,3
Residuo	0,312	32,2	49,6
Residuo	1,080	30,0	50,5
1% de residuo incorporado ao solo	0,029	29,4	49,8
1% de residuo incorporado ao solo	0,423	29,1	50,7
2% de residuo incorporado ao solo	0,036	30,6	49,9
2% de residuo incorporado ao solo	0,424	24,8	50,4
5% de residuo incorporado ao solo	0,079	30,7	50,5
5% de residuo incorporado ao solo	0,439	27,4	51,0
10% de residuo incorporado ao solo	0,036	29,3	50,5
10% de residuo incorporado ao solo	0,435	28,5	51,4

Tabela 3 – Valores da temperatura,  $T_{L/2}$ , e da difusividade térmica da amostra de solo, em função do tempo, em duas umidades diferentes.

t (min)	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,029 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,029 \text{ g.g}^{-1}$	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,436 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,436 \text{ g.g}^{-1}$
1	27,9	10,2	27,7	9,30
2	28,0	5,43	27,8	5,05
3	28,1	3,83	27,9	3,62
4	28,2	3,02	28,4	3,50
5	28,4	2,63	29,2	3,43
6	28,7	2,43	30,0	3,38
7	29,0	2,30	30,7	3,28
8	29,5	2,27	31,5	3,23
9	30,0	2,20	32,4	3,23
10	30,2	2,08	33,1	3,15
11	30,7	2,05	33,9	3,13
12	31,0	1,97	34,6	3,10
13	31,3	1,92	35,3	3,07
14	31,7	1,87	35,8	3,00
15	32,0	1,82	36,5	2,98
16	32,3	1,78	36,9	2,93
17	32,8	1,78	37,5	2,90
18	33,0	1,73	37,9	2,87
19	33,1	1,65	38,4	2,83
20	33,4	1,63	38,9	2,82
21	33,8	1,62	39,2	2,78
22	34,1	1,60	39,6	2,75
23	34,3	1,57	40,0	2,72
24	34,3	1,50	40,1	2,65
25	34,6	1,48	40,4	2,60
26	34,8	1,47	40,7	2,57
27	34,9	1,42	41,0	2,55
28	35,1	1,40	41,2	2,50
29	35,0	1,33	41,3	2,45
30	35,1	1,30	41,5	2,42

Tabela 4 – Valores das temperaturas em L/2 e da difusividade térmica da amostra de resíduo de silicato, em função do tempo, em duas umidades diferentes.

t (min)	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,312 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,312 \text{ g.g}^{-1}$	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 1,080 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 1,080 \text{ g.g}^{-1}$
1	32,4	9,55	29,2	10,2
2	32,4	5,27	29,2	5,43
3	32,6	4,03	29,3	3,83
4	32,6	3,02	29,5	3,40
5	32,9	2,78	29,9	3,07
6	33,0	2,40	30,3	2,88
7	33,3	2,28	30,9	2,72
8	33,6	2,25	31,5	2,65
9	33,9	2,13	32,1	2,57
10	34,2	2,05	32,6	2,52
11	34,6	2,03	33,2	2,43
12	34,9	2,00	33,7	2,40
13	35,1	1,92	34,4	2,35
14	35,4	1,85	34,8	2,30
15	35,7	1,85	35,4	2,27
16	36,0	1,80	35,8	2,23
17	36,3	1,78	36,2	2,18
18	36,5	1,73	36,7	2,17
19	36,8	1,70	37,0	2,13
20	36,9	1,67	37,4	2,10
21	37,1	1,62	37,8	2,08
22	37,3	1,58	38,1	2,12
23	37,4	1,53	38,4	2,08
24	37,6	1,52	38,8	2,05
25	37,7	1,47	39,0	2,02
26	37,9	1,45	39,2	1,98
27	37,9	1,42	39,5	1,97
28	38,0	1,38	39,7	1,93
29	38,2	1,37	39,9	1,90
30	38,3	1,33	40,1	1,87

Tabela 5 – Valores das temperaturas em L/2 e da difusividade térmica da amostra com 1% de resíduo de silicato incorporado ao solo, em função do tempo, em duas umidades diferentes.

t (min)	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,029 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,029 \text{ g.g}^{-1}$	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,423 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,423 \text{ g.g}^{-1}$
1	29,5	9,42	30,5	10,2
2	29,6	5,15	30,7	5,47
3	29,7	3,68	31,1	4,23
4	29,9	3,08	31,7	3,87
5	30,0	2,57	32,4	3,63
6	30,3	2,40	33,1	3,58
7	30,4	2,18	34,0	3,52
8	31,0	2,22	34,8	3,45
9	31,3	2,15	35,6	3,42
10	31,7	2,10	36,3	3,35
11	32,1	2,05	36,9	3,32
12	32,4	1,98	37,6	3,25
13	32,8	1,95	38,1	3,22
14	33,3	1,95	38,6	3,20
15	33,5	1,88	39,1	3,12
16	34,0	1,88	39,7	3,10
17	34,2	1,82	40,1	3,05
18	34,5	1,78	40,4	3,02
19	34,8	1,77	40,8	2,93
20	35,1	1,73	41,1	3,00
21	35,3	1,68	41,3	2,97
22	35,5	1,65	41,6	2,93
23	35,7	1,62	41,9	2,88
24	35,9	1,58	42,1	2,83
25	36,1	1,55	42,3	2,82
26	36,2	1,52	42,5	2,80
27	36,4	1,48	42,7	2,73
28	36,6	1,47	42,9	2,68
29	36,8	1,45	43,2	2,62
30	36,8	1,42	43,3	2,58

Tabela 6 – Valores das temperaturas em L/2 e da difusividade térmica da amostra com 2% de resíduo de silicato incorporado ao solo, em função do tempo, em duas umidades diferentes.

t (min)	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,036 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,036 \text{ g.g}^{-1}$	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,424 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,424 \text{ g.g}^{-1}$
1	30,8	10,4	32,4	9,18
2	31,0	5,95	32,4	4,98
3	31,0	3,95	32,6	3,72
4	31,3	3,40	33,1	3,48
5	31,4	2,93	33,8	3,43
6	31,7	2,68	34,5	3,38
7	32,0	2,48	35,1	3,30
8	32,4	2,38	35,9	3,30
9	32,7	2,30	36,6	3,25
10	33,1	2,22	37,3	3,25
11	33,5	2,1	37,9	3,20
12	33,8	2,12	38,5	3,17
13	34,3	2,10	39,0	3,15
14	34,6	2,05	39,6	3,12
15	34,8	1,97	40,1	3,10
16	35,3	1,97	40,5	3,05
17	35,6	1,93	40,9	3,03
18	35,9	1,90	41,2	3,00
19	36,1	1,85	41,6	2,98
20	36,4	1,82	42,0	2,93
21	36,7	1,78	42,3	2,92
22	36,8	1,75	42,5	2,83
23	37,0	1,72	42,8	2,82
24	37,2	1,68	43,0	2,78
25	37,4	1,65	43,2	2,75
26	37,7	1,63	43,4	2,70
27	37,8	1,58	43,5	2,68
28	37,9	1,55	43,6	2,65
29	38,1	1,55	43,8	2,62
30	38,2	1,52	43,9	2,57

Tabela 7 – Valores das temperaturas em L/2 e da difusividade térmica da amostra com 5% de resíduo de silicato incorporado ao solo, em função do tempo, em duas umidades diferentes.

t (min)	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,079 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,079 \text{ g.g}^{-1}$	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,439 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,439 \text{ g.g}^{-1}$
1	30,7	8,20	32,1	9,25
2	30,9	5,18	32,2	5,03
3	31,0	3,70	32,4	3,98
4	31,1	2,93	32,9	3,67
5	31,3	2,60	33,5	3,45
6	31,5	2,43	34,1	3,38
7	31,9	2,33	34,8	3,37
8	32,4	2,32	35,5	3,33
9	32,8	2,28	36,1	3,27
10	33,3	2,23	36,8	3,23
11	33,9	2,27	37,5	3,22
12	34,4	2,23	38,0	3,17
13	34,8	2,20	38,6	3,12
14	35,4	2,22	39,1	3,08
15	35,7	2,17	39,6	3,05
16	36,2	2,15	40,1	3,02
17	36,5	2,10	40,4	2,97
18	36,8	2,07	40,8	2,93
19	37,2	2,05	41,2	2,88
20	37,6	2,03	41,4	2,88
21	37,8	1,97	41,8	2,80
22	37,9	1,93	42,1	2,77
23	38,3	1,92	42,3	2,72
24	38,5	1,88	42,4	2,70
25	38,7	1,83	42,7	2,65
26	38,9	1,80	42,9	2,62
27	39,0	1,77	43,1	2,58
28	39,1	1,73	43,3	2,53
29	39,4	1,72	43,4	2,50
30	39,5	1,68	43,5	2,45

Tabela 8 – Valores das temperaturas em L/2 e da difusividade térmica da amostra com 10% de resíduo de silicato incorporado ao solo, em função do tempo, em duas umidades diferentes.

t (min)	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,036 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,036 \text{ g.g}^{-1}$	$T_{L/2}$ (°C) $\theta_g = 0,435 \text{ g.g}^{-1}$	$\alpha$ ( $\times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) $\theta_g = 0,435 \text{ g.g}^{-1}$
1	29,4	9,37	27,1	9,30
2	29,6	5,48	27,2	5,07
3	29,7	3,87	27,3	3,83
4	29,9	3,18	27,7	3,50
5	30,0	2,67	28,2	3,37
6	30,3	2,53	29,0	3,33
7	30,6	2,33	29,7	3,33
8	30,9	2,20	30,4	3,20
9	31,3	2,13	31,2	3,18
10	31,7	2,10	31,9	3,13
11	32,1	2,03	32,6	3,08
12	32,4	1,98	33,3	3,08
13	32,7	1,92	33,9	3,02
14	33,1	1,87	34,6	2,98
15	33,5	1,83	35,1	2,97
16	33,7	1,78	35,7	2,92
17	34,0	1,73	36,1	2,88
18	34,3	1,72	36,7	2,85
19	34,6	1,68	37,0	2,82
20	34,7	1,63	37,5	2,78
21	34,9	1,58	37,9	2,77
22	35,2	1,57	38,1	2,73
23	35,4	1,53	38,5	2,65
24	35,6	1,50	38,9	2,63
25	35,7	1,47	39,1	2,60
26	35,9	1,43	39,4	2,57
27	36,1	1,42	39,7	2,53
28	36,2	1,38	39,9	2,48
29	36,4	1,35	40,1	2,43
30	36,5	1,32	40,3	2,42