

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

HÉLCIO YOSABURO HATTORI

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA APARENTE DO
SOLO ALUVIÃO ARENOSO**

CURITIBA

2009

HÉLCIO YOSABURO HATTORI

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA APARENTE DO
SOLO ALUVIÃO ARENOSO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

**Co-Orientador: Prof. Dra. Kátia Cordeiro
Mendonça**

CURITIBA

2009

FOLHA DE APROVAÇÃO

DEDICATÓRIA

Para Mayumi, minha esposa e Dona Chizuru, minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Aos meus antepassados, apesar de não ter convivido com muitos deles, os seus valores e crenças chegaram a mim através dos meus pais.

Aos meus pais que não mediram esforços para minha formação como pessoa e profissional e também por me darem uma família maravilhosa.

A toda minha família pelos bons exemplos e incentivos para a que eu seguisse a carreira de professor.

A todos os professores de quem tive a honra de ter sido aluno e em especial aos professores Luís Mauro Moura e Kátia Cordeiro Mendonça do PPGEM da Pontifícia Universidade Católica do Paraná pela dedicação demonstrada no momento das aulas e pela valiosa orientação e condução durante o mestrado e também pela dedicação demonstrada no momento das aulas pela paciência e amizade.

Aos amigos do PPGEM-PUCPR que estiveram comigo nesta jornada, aos amigos da Sociedade Educacional de Santa Catarina – SOCIESC e por fim, aos amigos do Instituto Federal do Paraná – Campus Paranaguá. Agradeço à todos pela cooperação, incentivo e amizade.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente a condutividade térmica aparente de uma amostra de solo aluvião arenoso, observando a influência das condições climáticas externas ao solo sobre esta propriedade. Para este fim, foi desenvolvido um aparato experimental com base no método do fio quente para uma configuração com três resistências elétricas dispostas em diferentes profundidades da amostra de solo, de forma a permitir verificar também a influência da camada de solo na condutividade térmica do material. Sensores de baixa inércia térmica com o intuito de trabalharem em condições de gradientes térmicos inferiores a 1K foram especialmente confeccionados, permitindo uma avaliação mais adequada da propriedade térmica em questão do que os sensores comerciais usualmente empregados. Os ensaios foram realizados em cinco condições psicrométricas diferentes do ambiente circundante: 60% de umidade relativa com temperaturas de 30, 25, 20 e 15 °C, e umidade relativa de 20% e temperatura de 25°C. Os resultados mostraram uma diminuição da condutividade térmica com o aumento da temperatura e com a diminuição da umidade relativa do ar, em função da redução provocada por essas variáveis no conteúdo de umidade do solo. Com as resistências posicionadas em profundidades diferentes, observou-se que o valor da condutividade térmica variou com a espessura da camada de solo, sendo que a região mais próxima da superfície foi a mais afetada por esta alteração, deste modo, verificou-se a dificuldade da migração da umidade na amostra de solo.

Palavras-chaves: Condutividade térmica aparente. Solos. Método fio quente

ABSTRACT

This work aimed to determine experimentally the thermal conductivity of a soil Brazilian standard, noting the influence of weather conditions on this property. To this end, we developed an experimental apparatus based on hot wire for a configuration with three electric heaters placed at different depths of the soil sample in order to allow also check the influence of the soil layer on the thermal conductivity. Sensors of low thermal inertia in order to work in conditions of temperature gradients of less than 1K are specially made, allowing a better assessment of the thermal property in question than the commercial sensors usually employed. The tests were performed on five different psychrometric conditions of the surrounding environment: 60% relative humidity with temperatures of 30, 25, 20 and 15 ° C and relative humidity of 20% and 25 ° C. The results showed a decrease in thermal conductivity with increasing temperature and with decreasing relative humidity, due to the reduction caused by these variables in the moisture content of soil. With the resistance placed at different depths, it was observed that the value of thermal conductivity varied with the thickness of the soil, and the region closer to the surface was the most affected by this change, thus there was the difficulty the migration of moisture in the soil sample.

Keywords: Apparent Thermal Conductivity. Soils. Hot wire method

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Representação dos diferentes tipos de poros	25
Figura 4.1 – Principais dimensões da caixa	41
Figura 4.2 – Esquema da montagem elétrica	43
Figura 4.3 – Módulo de aquisição de dados	43
Figura 4.4 – Sistema de aquisição de dados	44
Figura 4.5 – Caixa de acrílico com as resistências e termopares	45
Figura 4.6 – Conjunto caixa e balança	46
Figura 5.1 – Perfil temporal de temperatura na resistência R1	52
Figura 5.2 – Curva linearizada do perfil de temperatura de R1	53
Figura 5.3 – Variação da condutividade térmica aparente do ensaio 1	56
Figura 5.4 – Variação da condutividade térmica aparente do ensaio 2	57
Figura 5.5 - Variação da condutividade térmica aparente do ensaio 3	58
Figura 5.6 - Variação da condutividade térmica aparente do ensaio 4	59
Figura 5.7 – Comparativo entre valores da condut. térmica aparente em R1.....	60
Figura 5.8 - Comparativo entre valores da condut. térmica aparente em R2	62
Figura 5.9 - Comparativo entre valores da condut. térmica aparente em R3	63
Figura 5.10 - Comparativo entre valores da condut. térmica aparente em R1	64
Figura 5.11 - Comparativo entre valores da condut. térmica aparente em R2.....	65
Figura 5.12 - Comparativo entre valores da condut. térmica aparente em R3	66
Figura 5.13 – Variação da massa da amostra e da condut. térmica aparente	67
Figura 5.14 – Variação da condutividade térmica aparente com o conteúdo de umidade	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação dimensional dos poros	25
Tabela 3.2 – Tamanho médio dos grãos de solos	26
Tabela 5.1 – Condições psicrométricas do ambiente externo	51
Tabela 5.2 – Valores máximos e mínimos da condutividade térmica aparente	69
Tabela 5.3 – Incerteza de medição das variáveis	70
Tabela 5.4 – Valores máximos das variáveis	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BTU – British Thermal Unit

CLP – Controlador Lógico Programável

CLTM – Corrected Laplace Transform Method

IM – Incerteza de Medição

IMG – Incerteza de Medição do Parâmetro G

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry

LST – Laboratório de Sistemas Térmicos

MFHPP - Sonda Multifuncional de Pulso de Calor

NHS – Método Nassar & Horton

PUCPR – Pontifícia Universidade Católica do Paraná

TDR – Time Domain Reflectometry

UR – Umidade Relativa

c_p – Calor específico volumétrico

T_0 – Temperatura inicial

t_0 – Tempo inicial

T_i – Temperatura no instante i

t_i – Tempo no instante i

q' – Densidade linear de potência

Z_1, Z_2, Z_3 – Posição das resistências 1, 2 e 3 (profundidade em referência a superfície livre)

V_1, V_2, V_3 – Tensão elétrica na resistência 1, 2, e 3.

x_n – Variáveis independentes

LETRAS GREGAS

α – Difusividade térmica

λ – Condutividade térmica

ρ – Peso específico

π - Pi = 3,141592...

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	24
3.1 Materiais porosos	24
3.2 Propriedades térmicas	27
3.2.1 Condutividade térmica	27
3.2.2 Difusividade térmica	29
3.3 Permeabilidade do solo	30
3.4 Transporte de umidade e calor no solo	30
3.5 Transporte de água em solos	31
3.6 Métodos de determinação da condutividade térmica	32
4 MÉTODO DE MEDIÇÃO E APARATO EXPERIMENTAL	35
4.1 Método fio quente	35
4.2 Procedimento de medição	37
4.3 Análise de erros	46
5 RESULTADOS	51
5.1 Avaliação da influência da profundidade do material	53
5.2 Avaliação da influência das condições climáticas do ambiente externo	60
5.2.1 – Influência da umidade relativa do ar	60
5.2.2 – Influência da temperatura do ar	63
5.3 Avaliação da influência do conteúdo de umidade	67

5.4 Cálculo das incertezas	69
6 CONCLUSÃO	72
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

As propriedades térmicas do solo são estudadas por pesquisadores de diversas áreas (agronômica, engenharias, arquitetura, ciências térmicas) e em diversos países, pois, a composição química e a natureza do solo são diferentes para cada país. Os experimentos em laboratórios e em campo têm como objetivo ampliar os conhecimentos sobre estas propriedades e, deste modo serem aplicadas com a finalidade, por exemplo, de melhorar a produção agrícola e reduzir o consumo de energia em edificações. Nestas áreas encontram-se dois problemas de magnitude mundial, a fome, que ocorre devido ao aumento da população sem que haja produção de alimento suficiente e a crise energética que vem se agravando com o aumento da demanda, sendo reforçada pelas questões ambientais. O fato de se conhecer as propriedades termofísicas dos solos não eliminará de imediato estes problemas, mas a busca pela solução destes requer conhecimentos aprofundados sobre estas propriedades.

Outras áreas onde são empregados os conhecimentos sobre a condutividade térmica são: projeto e instalação de linhas de transmissão de energia elétrica a alta tensão enterradas, projetos e instalação de dutos subterrâneos para transporte de gás e petróleo, depósitos no subsolo de resíduos nuclear e estudos sobre aquecimento e congelamento no solo (Naidu, 2004).

Entre as propriedades térmicas do solo existentes, será abordada a condutividade térmica, esta propriedade apresenta forte dependência dos fatores do solo (natureza e composição química), do grau de compactação, da granulometria e do conteúdo de umidade presente no meio.

Existem diversos modelos numéricos para a simulação da transferência de calor e massa em meios porosos, inclusive solos, entretanto a exatidão da solução depende do perfeito conhecimento das propriedades termofísicas e de transporte destes meios.

Segundo Simioni (2005) *apud* Müller (2007), os métodos de medição das propriedades térmicas são divididos em dois grupos: i) métodos estacionários e ii) métodos dinâmicos. Segundo Moura (1993), os métodos dinâmicos são mais rápidos, porém são mais difíceis de serem realizados. Os métodos estacionários são mais fáceis, no entanto, demandam grande quantidade de tempo para estabelecer o regime permanente de transporte de calor no experimento. Métodos transientes ou dinâmicos podem, além da condutividade térmica, permitir a medição da difusividade térmica e calor específico dos materiais.

Para a determinação da condutividade térmica de um material, pode-se empregar a equação de Fourier, desde que as temperaturas nas faces de entrada e saída do fluxo de calor sejam conhecidas e se encontrem estáveis. Além disso, fluxo de calor deverá ser unidirecional e seu valor conhecido. O método da placa quente protegida utiliza-se deste princípio e de acordo com Simioni (2005), este método é utilizado para determinar a condutividade térmica de amostras planas de materiais homogêneos, isolantes ou com condutividade térmica baixa.

Quando as informações necessárias para o emprego da equação de Fourier não forem conhecidas, pode-se recorrer aos métodos experimentais, neste caso, a montagem de um aparato para determinar a condutividade térmica ou a difusividade térmica pode ser utilizado. No processo de coleta de dados, pode-se utilizar a técnica que utiliza sensores de dissipação de calor, neste caso é medida uma variação da temperatura em um determinado intervalo de tempo na fonte que gera o calor ou pulso de calor. As limitações destas técnicas são o tempo de execução do experimento que tende a ser longo devido à demora em atingir a estabilidade da temperatura e a sensibilidade de algum dos parâmetros mediante as variações das condições de ensaio.

Estes experimentos podem ser realizados em amostras de solos preparadas (secada e peneirada), para quando o experimento é realizado em laboratórios e deste modo, possibilitando a imposição de alguns parâmetros, ou "*in situ*", neste caso as condições do experimento estão sujeitas às condições climáticas do local de observação.

O objetivo do presente trabalho é determinar experimentalmente o valor da condutividade térmica do solo utilizando o Método do Fio Quente, que será explanado no capítulo 4, observando a influência do conteúdo de umidade e da temperatura do solo.

Para este fim, um aparato experimental foi concebido, projetado e montado no Laboratório de Sistema Térmico da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Como sensores comerciais geralmente possuem uma massa térmica elevada em função de detalhes construtivos, sobretudo inerentes à durabilidade, a proposta deste trabalho é desenvolver sensores de baixa inércia térmica para trabalharem em condições de variação de temperatura inferiores a 1K. Esta condição é essencial para o estudo de problemas onde haja migração de umidade visto que alterações significativas no campo térmico do meio provocam também alterações importantes no conteúdo de umidade local. Desta maneira foram construídos sensores onde os elementos de medição de temperatura (termopares) são posicionados diretamente sobre os fios que servem de elementos de aquecimento e estes inseridos no interior do solo. Estes fios foram recobertos com uma fina camada de verniz de eletromotriz que serve de isolante elétrico tendo todo o conjunto uma inércia térmica e dimensões muito inferiores quando comparado aos sensores comerciais. Os sensores comerciais são geralmente construídos utilizando também um conjunto fio aquecedores e termopar, mas inseridos dentro de um tubo metálico que confere robustez ao conjunto e aumenta sua inércia térmica também.

Para a realização dos ensaios experimentais utilizou-se uma amostra do solo Aluvião Arenoso, para o qual o LST-PUCPR possui amostra, o material passou por um processo de secagem e posteriormente foi peneirado, estes procedimentos permitiram obter uma amostra homogeneizada. O solo foi condicionado em uma caixa de acrílico de dimensões 300 mm x 300 mm x 170 mm e foram instalados três sensores dispostos em posições regulares a partir da superfície do solo. Medições de condutividade térmica foram realizadas variando-se as condições de umidade e temperatura externamente a caixa.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 1 refere-se à introdução, onde o objetivo do trabalho é apresentado, destacando-se a importância da medição da condutividade térmica e as aplicações nas diversas áreas. É apresentado um breve relato de algumas das principais técnicas de coletas de dados.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde são citados os trabalhos consultados pertinentes ao assunto e os respectivos autores. Nestas citações é feito um breve comentário sobre a metodologia e os resultados obtidos.

No Capítulo 3 os fundamentos teóricos relacionados ao objeto de estudo serão apresentados, trazendo em destaque uma explanação sobre transferência de calor e massa em meios porosos e as propriedades termofísicas envolvidas neste processo.

O Capítulo 4 refere-se ao aparato experimental, nele está descrito o funcionamento e os acessórios utilizados para a coleta dos dados, como também o método, critérios e a incerteza de medição.

No capítulo 5 estão apresentados os resultados bem como a estimativa dos erros ocorridos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões quanto ao experimento e os resultados e também sobre as perspectivas de trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Leal (2003) o estudo do transporte de umidade e calor em solos não-saturados iniciou-se a partir do modelo simples de fluxo volumétrico de líquido em meios poroso saturado apresentado por Darcy (1856) e que foi estendido por Buckingham-Darcy (1907) para um meio poroso não-saturado. Philip e De Vries (1957) foram os primeiros a modelar o fenômeno de migração de umidade sob o ponto de vista macroscópico, onde de Vries (1958) generalizou o modelo dando distinção especial às mudanças de fase (líquida e vapor) que ocorre com a umidade.

Rose (1968) realizou experimento em campo para analisar a transferência de umidade em solos durante um período de seis dias consecutivos, com uma amplitude térmica de aproximadamente 20°C na superfície no período diurno. As condições de balanço do conteúdo de água abaixo da superfície foram obtidas a partir de dados teóricos, desconsiderando a contribuição do fluxo de vapor devido ao gradiente de temperatura. Nestas pesquisas, foram encontrados valores muito dispersos quando comparados com os dados teóricos durante certos períodos de observação.

Jackson *et al.* (1974) encontraram boa aproximação entre valores teóricos e experimentais para observações realizadas durante o período noturno, mas o mesmo não ocorria quando o experimento ocorria durante o período diurno, principalmente quando a superfície superior do solo era o foco de observação. Observações semelhantes foram feitas por Wierenga e de Wit (1970) no estudo em campo da transferência de calor em solos.

Jury (1979) estudou a transferência de calor e umidade em areias, a relação entre os dados teóricos e o experimental foi somente parcial. Ele também demonstrou que as equações de fluxo baseadas nos processos termodinâmicos irreversíveis estão relacionadas com as equações de Philip e de Vries.

Crausse (1983) realizou um trabalho semelhante ao de Jury, ele encontrou uma boa relação entre os valores calculados e medidos para a difusividade quando considerado uma abordagem macroscópica, para tanto ele considerou o valor de $D_{\theta v}$ próximo dos valores relacionados com a teoria. Ele também obteve uma boa aproximação para as medições da temperatura quando este é função do potencial de umidade e da condutividade hidráulica.

Clivati (1991) propôs um método para determinação da difusividade térmica em regime transitório, numa coluna de solo finita, a partir da solução particular da equação diferencial parcial que descreve o fluxo de calor em meios porosos com umidade constante. Esta equação apresenta como solução uma série senoidal de infinitos termos, com rápida convergência, e utilizando-se todos estes termos foi encontrado o valor da difusividade térmica não muito diferente do valor encontrado no método de comparação.

Baggio *et al.* (1997) utilizaram equações de equilíbrio termodinâmico e suas derivações para analisar modelos de transferência de calor e massa em meios porosos, esta opção deve-se ao fato destes serem poucos utilizados nos trabalhos até então desenvolvidos. Foi dado um enfoque para a Equação de Clapeyron-Clausius e Equação de Kelvin, que apresentaram bons resultados quando o meio é considerado um sistema microscópico.

Silva Neto *et al.* (1999) utilizaram o método de Levenberg-Marquardt (LM) para a solução do problema inverso em condução de calor para se estimar a condutividade térmica e o calor específico de novos materiais São utilizados dados experimentais reais obtidos através do método do fio quente.

Dantas *et al.* (2003) aplicaram a solução de problemas inversos para estimar os parâmetros pertinentes à transferência de calor e massa em meios porosos capilares, durante o processo de secagem de madeira e cerâmica. O objetivo principal foi determinar simultaneamente os parâmetros que estão associados a formulação física destes tipos de problemas, quando estes ocorrem em regime de temperatura e umidade transiente.

Orlande *et al.* (2003) utilizaram a solução de problema inverso empregando-a para a resolução de problemas de transferência de calor e massa, com a finalidade de determinar as propriedades termofísicas de meios porosos, e apesar do objetivo do estudo não ser o solo, este método permite trabalhar com este tipo de material.

Antczak *et al.* (2003) apresentaram métodos para identificar a efusividade térmica aparente do solo, destacando que esta também é uma propriedade importante para prever o comportamento do solo úmido. Neste estudo, foi utilizada uma abordagem macroscópica do meio, porém, são destacadas três hipóteses que deverão ser consideradas:

- (i) A fonte de calor a ser utilizada para gerar o pulso de energia deverá ter a menor intensidade possível para que não ocorra perturbação que poderá interferir nas medições da variação da temperatura.
- (ii) Por ser um sistema aberto, torna-se necessário que o intervalo de tempo seja suficiente para que os valores obtidos no experimento sejam os mais próximos dos valores reais.
- (iii) Deverá ser utilizado um método apropriado para medições em campo, principalmente para observações na superfície do solo sujeito à transferência de umidade.

Abu-Hamdeh (2003) estudou a interferência das propriedades térmicas dos solos na germinação das sementes e no crescimento das culturas. Inicialmente ele analisou o efeito do índice de umidade no valor do calor específico e na difusividade térmica na amostra do solo, também foi analisado o efeito do índice de umidade e da densidade absoluta no calor específico volumétrico do solo. Em laboratório, ele empregou o método do calorímetro para determinar o calor específico de dois tipos de solos, o arenoso (90% de areia, 5% de sedimentos e 5% de argila) e o argiloso (20% de areia, 22% de sedimentos e 58% de argila). Neste experimento, ele observou que o calor específico sofre uma variação quase linear para índice de umidade acima de 15%, de acordo com os dados obtidos, observou-se que a variação do calor específico foi mais rápida no solo argiloso.

Naidu e Singh (2003) utilizaram uma sonda modificada para medição da condutividade térmica do solo em campo, com o objetivo de medir esta propriedade para solos com granulometria variada e em regime transiente. Neste experimento, observou-se que os resultados foram obtidos de modo rápido e coerentes com os valores descritos na literatura.

Mortensen, *et al.* (2005) empregaram uma sonda que utiliza-se da técnica de pulso de calor combinado com sistema de medição da condutividade elétrica do solo. Esta sonda, denominada de Sonda Multifuncional de Pulso de Calor (MFHPP) permite avaliar as propriedades térmicas, o teor de umidade e dispersão da água no solo. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os valores encontrados através do HYDRUS 2D e estes demonstraram que esta técnica apresenta bom potencial de uso em medições das propriedades térmicas de solos insaturados.

Liu *et al.* (2005) desenvolveram um modelo matemático para descrever a transferência simultânea de calor e umidade no solo não saturada com uma camada superficial seca, para tanto empregaram o método de volume médio. Neste experimento foi investigada a evaporação da água em regime de distribuição transiente de calor em condições ambientais. Para validar o modelo, eles realizaram um experimento reproduzindo as condições do ensaio e outro experimento foi realizado em câmaras fechadas, onde observou-se o efeito da temperatura no transporte de umidade no solo. Os resultados obtidos demonstraram que a migração de calor e umidade é muito afetada devido à presença da camada superficial seca.

Flora (2006) analisou a influência da massa específica na difusividade térmica do solo em diferentes teores de umidade. A variação da massa específica foi obtida através da compactação da amostra de solo, resultando em quatro níveis de grau de compactação. Utilizando sensores de variação de temperatura (termopares) posicionados a uma determinada distância da fonte de calor, estimou-se o valor da condutividade térmica da amostra. Em paralelo, foi empregada uma solução numérica (Método Diferenças Finitas) para comparar os valores obtidos e observou uma boa eficiência do experimento.

Silans *et al.* (2006) trabalhou na determinação em campo da difusividade térmica no solo da região de Caatinga na Paraíba através de sonda TDR. Três métodos de cálculo foram utilizados e os resultados foram comparados. Eles observaram que o Método Harmônico não se apresentou adequado para o tipo de solo analisado; o Método CLTM (Corrected Laplace Transform Method) apresentou bons resultados quando aplicado nas camadas superficiais com profundidade até 50mm e em todos os casos o Método NHS (método de Nassar & Horton) que considera variações verticais da difusividade térmica, apresentou uma dispersão elevada dos seus pontos, porém forneceu valores próximos dos valores estimados pelo método CLTM na camada superior e valores coerentes nas outras camadas.

Akinyemi e Mendes (2006) desenvolveram trabalhos de investigação em solos, aplicando a simulação numérica e verificações experimentais observaram que condições de contorno, período de aquecimento, tempo de simulação e malha refinada são parâmetros importantes para a condução do experimento. Os resultados da simulação numérica com os valores experimentais apresentaram boa convergência.

Zhang, *et al.* (2006) considerando os elementos constitutivos do solo através de elementos cúbicos de tamanho uniforme e dispersos aleatoriamente, mediram a condutividade térmica efetiva a partir das propriedades térmicas e frações de volume de cada um dos componentes. Para tanto utilizaram o modelo misto de arranjo randômico (RMM) para determinar as propriedades térmicas do solo. Os resultados obtidos demonstraram que este modelo apresenta boa consistência.

Carpentier, *et al.* (2007) realizaram experimentos em campo para determinar as propriedades termofísicas do solo, considerando a troca de calor que ocorre entre a superfície e uma camada situada logo abaixo. Este experimento caracteriza-se por ser de fácil manuseio, baixo custo e não necessita de uma fonte de calor, pois as variações dos parâmetros temperatura e umidade ocorreriam devidas às variações climáticas do período.

Barros *et al.* (2007) destacaram a aplicação da calorimetria na investigação das propriedades térmicas do solo. Apesar de reconhecer que esta técnica apresenta pouca divulgação devido às dificuldades da análise destas propriedades sob o ponto de vista

termodinâmico, os autores defendem que a calorimetria apresenta-se como um método apropriado no estudo das propriedades térmicas dos solos.

Modelos acoplados de transporte de calor e de umidade em solos sem cobertura vegetal (Novak e Black, 1985; Passerat de Silans *et al.*, 1989) ou em superfícies com cobertura vegetal (Braud *et al.*, 1994; Smirnova *et al.*, 1997) exigem informações sobre os perfis de temperatura e o fluxo de calor no solo, os quais dependem das propriedades térmicas dos solos. Estas propriedades são (i) a condutividade térmica, que representa a habilidade do solo em conduzir calor em regime permanente; (ii) a difusividade térmica, que representa a habilidade do solo em difundir calor, isto é, é uma medida do tempo necessário para as variações de temperatura se propagarem e (iii) a capacidade calorífica volumétrica, que indica a habilidade do solo em armazenar calor, isto é, expressa a variação de temperatura resultante de um determinado ganho ou perda de calor. As propriedades térmicas citadas, por sua vez, dependem do conteúdo de umidade do solo, da composição e estrutura do solo, da presença de cobertura vegetal e do tipo de cultura ou vegetação (sombreamento, influência da raiz sobre o conteúdo de umidade do solo).

As referências mencionadas demonstram que no estudo de transferência de calor e umidade em meios porosos, mais precisamente em solos, trabalhos experimentais em campo e em laboratórios e simulações numéricas estão sendo desenvolvidas por diversos pesquisadores e em diversos países. A determinação destes dados a partir de experimentos *in situ*, tendo como variável o conteúdo de água no solo são importantes devido ao crescente interesse em confrontar os valores obtidos com os resultados adquiridos em modelos matemáticos.

O fato do solo não apresentar características químicas, físicas e biológicas únicas, faz com que cada país procure desenvolver pesquisas nesta área e desta forma utilizar melhor o recurso da irrigação para a produção de alimentos ou na construção civil para a construção de edificações com melhor eficiência energética.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3 Introdução

Neste capítulo serão abordados os tópicos pertinentes ao trabalho, tais como as propriedades termofísicas e os fenômenos de ocorrência envolvendo o solo, a umidade relativa e a temperatura. Inicia-se com uma abordagem sobre materiais porosos e a correlação entre a porosidade e o tipo de solo.

3.1 Materiais porosos

Uma grande parcela de materiais apresenta níveis de porosidade e que as diferenças neste quesito ocorrem nas dimensões, formatos e no modo de conectividade dos poros. Estes fatores interferem na resistência mecânica, na sua capacidade de retenção de água, na condutividade térmica e peso específico do material, definindo a sua aplicabilidade em diversos setores, desde a agricultura até a construção civil.

Os solos são constituídos por uma mistura de partículas sólidas de natureza mineral e orgânica, ar e água, formando um sistema trifásico, sólido, gasoso e líquido. As partículas da fase sólida variam tamanho, forma e composição química e a sua combinação nas várias configurações possíveis forma a chamada matriz do solo (Reinert e Reinert, 2006).

A porosidade do solo, por sua vez, é responsável por um conjunto de fenômenos e desenvolve uma série de mecanismos de importância na física de solos, tais como retenção e fluxo de água e ar, e, se analisada conjuntamente com a matriz do solo, gera um grupo de outras propriedades físicas do solo associadas às relações de massa e volume das fases do sistema solo (Reinert e Reinert, 2006).

Na tabela 3.1, apresenta-se a classificação dos poros em função dos tamanhos médios dos poros.

Tabela 3.1 – Classificação dimensional dos poros

Classificação	Tamanho dos poros (10^{-9} m)
microporos	menores que 2
mesoporos	de 2 a 50
macroporos	acima de 50

Fonte – IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry

Pode-se classificar a maioria dos tipos de solos como sendo mesoporos e macroporos. As variações na granulometria ocorrem devido à origem, composição química, fenômenos naturais e atividades humanas sobre o solo.

De acordo com Campos (2008), outro critério utilizado para classificar os solos baseia-se na sua granulometria, que considera quatro grupos: Rochas (terreno rochoso, solo arenoso, solo silteoso e solo argiloso). Esta classificação considera a característica predominante do solo, isso significa que um solo arenoso não é formado somente por areia, mas que apresenta uma grande quantidade deste material. Considerando o tamanho dos grãos pode-se agrupar os solos seguindo os valores da tabela 3.2

Tabela 3.2 – Tamanho médio dos grãos dos solos

<i>Tipo de solo</i>	<i>Argila</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Areia média</i>	<i>Areia grossa</i>	<i>Pedregulho</i>
Diâmetro	até	0,005	0,05	0,15	0,84	4,8
médio	0,005	a	a	a	a	a
(mm)		0,05	0,15	0,84	4,8	16

Fonte: Campos, 2008 - <http://www.forumdaconstrucao.com.br>

Pelo fato da amostra utilizada ter sido preparada, visualmente pode-se enquadrar o solo analisado entre Areia fina e Areia média.

Entre as grandezas relacionadas aos meios porosos, de acordo com Mendes (1997), têm-se as seguintes definições:

a. Porosidade que é a razão entre o volume do espaço poroso e o volume total do sólido envolvente. Esta propriedade do material interfere em outras, tais como a condutividade térmica, o peso específico e a resistência mecânica e sendo alvo de estudos, principalmente na área de ciências térmicas.

b. Umidade relativa definido como a relação entre a fração molar de vapor de água no ar úmido e a fração de vapor de água no ar saturado a mesma temperatura com pressão total.

c. Conteúdo volumétrico de umidade é o volume de água nas fases líquida e gasosa condensável presente no meio dividido pelo volume total do meio.

d. Tortuosidade é o quadrado da razão entre o comprimento do caminho efetivo médio, no meio poroso e a distância mais curta, medida numa determinada direção.

Pelo fato do solo ser um meio muito poroso, os itens citados anteriormente interferem no comportamento deste, principalmente quando o conteúdo de umidade é considerado, modificando o modo de como ocorre a transferência de calor e massa neste meio.

Qualquer que seja a aplicação, os objetivos das pesquisas sobre o transporte de calor e umidade no solo não diferem muito, consistem basicamente no uso racional dos recursos naturais, melhorias na produção agrícola e na economia de energia.

A capacidade e o modo com que um solo conduz o calor é uma informação utilizada em diversos segmentos. A quantidade de água necessária para irrigação e o processo de germinação das sementes são itens que são fortemente dependentes da forma como ocorre a transferência de calor e umidade no solo. Da mesma forma, o conforto térmico em edificações e a durabilidade das estruturas das edificações são influenciados por este fenômeno.

Entre as propriedades que caracterizam o solo, será dado destaque para a condutividade térmica. Entretanto, outras propriedades térmicas pertinentes ao assunto também serão abordadas.

3.2 Propriedades térmicas

3.2.1 Condutividade térmica

Essa propriedade, classificada como uma das propriedades de transporte da matéria fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão de calor. Ela depende da estrutura física da matéria, a nível atômico e molecular, que por sua vez, está relacionada ao seu estado físico (Incropera e De Witt, 1998). Ainda, de acordo com a NBR 12538, sob o título geral “Desempenho térmico de edificações”, define a condutividade térmica como: propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 K/m .

A condutividade térmica representa a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área por unidade de tempo sob um gradiente de temperatura unitário. É uma propriedade térmica importante porque determina a capacidade que um material possui para transferir energia térmica. É também a propriedade essencial que controla o fluxo de calor. A faixa de valores de condutividade térmica para solos finos, tais como: siltes, argilas siltosas, siltes argilosos e argilas é de $0,25$ a $2,5 \text{ W/m.K}$ de acordo com Mitchell (1991). Esta faixa de variação é para solos saturados, condição onde a amostra retém a quantidade máxima de umidade.

Como a condutividade térmica da parte mineral do solo é em média aproximadamente $1,7 \text{ W/m.K}$ e as condutividades térmicas da fase de água e ar são $0,6$ e $0,026 \text{ W/m.K}$ respectivamente, o calor se transfere principalmente através das partículas sólidas. Devido à condutividade térmica da água ser maior do que a do ar,

um solo úmido tem uma condutividade térmica maior do que um solo seco (Leal, 2003), este fato ocorre somente se for considerada a transferência de calor, desprezando-se a transferência de massa ou mudança de fase que ocorre nos poros.

Quando existir fluxo transiente, o comportamento térmico de um solo é governado não somente pela condutividade térmica, mas também pela sua capacidade de aquecimento volumétrico por unidade de volume de um dado solo que é a energia de calor necessária para mudar a temperatura de seu volume unitário de 1 °C. Este coeficiente é definido como o produto do calor específico - c (cal / g °C) e da massa específica seca - ρ (g / cm³) (Duarte, 2004).

3.2.2 Difusividade térmica

A difusividade térmica é a propriedade física definida pela relação entre a condutividade térmica e o calor específico volumétrico (ABNT NBR 12538). Esta grandeza expressa a rapidez de mudança da temperatura do material, quando submetido à variação de temperatura externa.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3.1)$$

Onde:

α - difusividade térmica [m²/s]

λ - condutividade térmica [W/(m.K)]

ρ - massa específica [kg/m³]

c_p – calor específico [J/kg.K]

Quanto maior o valor da difusividade térmica, 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.

Esta propriedade térmica do solo reflete a sua capacidade em transportar o calor para o interior do meio em regime transiente. A uma difusividade baixa, por exemplo, pode-se associar uma temperatura alta na superfície e pequena profundidade de penetração do calor. Ela depende, dentre outros fatores, da constituição, granulometria, densidade e estrutura do solo, propriedades estas que, na escala de tempo do experimento ou dos processos hidrológicos, não variam com o tempo, mas podem variar com a profundidade e com o conteúdo de umidade do solo.

3.3 Permeabilidade do solo

É a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através de seus vazios de um ponto de mais alta energia para um ponto de mais baixa energia. A permeabilidade é medida pelo coeficiente de permeabilidade, K , que indica o avanço de uma quantidade fixa de líquido atravessa o solo no intervalo unitário de tempo.

O fluxo de calor por condução pode ser comparado ao fluxo de um fluido e neste caso, a condutividade hidráulica é análoga a condutividade térmica.

3.4 Transporte de massa e calor no solo

O fluxo de calor através do solo envolve operações simultâneas de vários mecanismos de transporte. A condução é responsável pelo fluxo de calor através dos materiais sólidos, enquanto que através dos poros três mecanismos ocorrem em paralelo: condução, convecção e radiação. Quando a água está presente o calor latente de vaporização é um fator adicional envolvido na transferência de calor (Jackson e Taylor, 1986).

Em vários casos, se certas condições são observadas, mecanismos de transferência de calor que não sejam por condução podem ser negligenciados e a modelagem matemática da condução de calor em solos homogêneos e isotrópicos pode ser aplicada para descrever o fluxo de calor em solos. O termo transferência de calor no presente trabalho irá se referir somente à transferência de calor por condução (Leal, 2003).

A descrição real do processo de transporte de umidade e calor em meios porosos não saturados torna-se complicada devido a diferentes fatores. De acordo com Leal (2003), solos contêm partículas sólidas que são habitualmente desordenadas e espaços irregulares (geometricamente e dimensionalmente) nos poros, que são preenchidos com fluidos, formando tortuosos caminhos interconectados. A água pode ser transportada por difusão do líquido devido a diferentes concentrações de soluto, difusão do vapor, evaporação e condensação interna, fluxo devido a forças de capilaridade ou gravidade e fluxo de líquido e vapor devido a diferenças na pressão total (Bruin e Luyben, 1980 apud Hampton, 1989). Essas diferenças de pressão podem ser geradas por pressões externas, capilaridade, contração ou por altas temperaturas no interior do material úmido. Frequentemente, existe uma combinação de diversos mecanismos de transporte e estes se comportam distintamente devido às condições do meio analisado.

3.5 Transporte de água em solos

O movimento da água no solo pode ocorrer por influência de diferentes forças. Em solos molhados e com presença de pequenos canais a água pode escoar com certa facilidade, movimentada basicamente pelas forças gravitacionais (percolação). Para solos apenas saturados a tensão superficial da água contida nesses pequenos canais poderá exceder a força gravitacional e provocar movimentos ascendentes (capilaridade).

Em solos não saturados as forças gravitacionais e a tensão superficial não são significativas para o movimento da água, porque não há massa suficiente para

preencher os canais. A água acaba sendo então absorvida pelas partículas de solo e também passando de partícula para partícula, devida à diferença de teor de umidade entre elas. Esse processo é chamado de difusão de vapor.

O potencial matricial é o resultado da ação das forças capilares e de adsorção, devido à interação entre a água e as partículas sólidas, que é função da matriz do solo. Estas forças atraem e "fixam" a água no solo, diminuindo sua energia potencial com relação à água livre. São fenômenos capilares que resultam da tensão superficial da água e de seu ângulo de contato com as partículas sólidas. Cada solo apresenta uma relação entre o conteúdo de umidade e o potencial matricial, característica determinada pela textura e estrutura do solo (Reichardt, 1990).

Para altos teores de umidade, nos quais fenômenos capilares são de importância na determinação de potencial matricial a curva característica depende da geometria da amostra, isto é, do arranjo e das dimensões dos poros. Ele passa, então, a ser uma função da densidade global do solo e da porosidade. Para baixos teores de umidade, o potencial matricial praticamente independe de fatores geométricos, sendo a densidade global e a porosidade de pouca importância em sua determinação (Reichardt, 1990).

3.6 Métodos de determinação da condutividade térmica

Os métodos de medição das propriedades térmicas são divididos em dois grupos: i) métodos estacionários e ii) métodos dinâmicos. Segundo Moura (1993), os métodos dinâmicos são mais rápidos, porém são mais difíceis de serem realizados. Os métodos estacionários são mais fáceis, no entanto, demandam grande quantidade de tempo para estabelecer o regime permanente de transmissão de calor no experimento. Métodos transientes ou dinâmicos podem, além da condutividade térmica, permitir a medição da difusividade térmica e calor específico dos materiais.

Uma possível forma de determinar o valor da condutividade térmica é a partir da Lei de Fourier, sendo o valor do fluxo térmico e a variação de temperatura na direção deste fluxo conhecidos. Entretanto, este procedimento é mais recomendável para

materiais homogêneos e que preferencialmente as temperaturas nas faces limites sejam conhecidas e que se encontrem estáveis.

Para as amostras de solos, que se caracterizam por apresentar porosidade, composição química variada e umidade com mudança de fase, este procedimento não é o mais recomendado. Para este tipo de material um método de determinação que pode ser usado é o método do fio quente, que foi o empregado neste trabalho.

Existem vários métodos de medição baseados na técnica do fio quente: arranjo de Haupin, técnica padrão de fio quente (cruz de medição), técnica de resistência do fio quente, técnica de dois termopares e a técnica de fio quente paralelo (Porfírio, 2006).

O método do fio quente, descrito por Shieirmacher (1888), é um método absoluto, direto e não estacionário. Van Der Held e Van Drunem (1949) foram os que pela primeira vez fizeram uso prático dessa técnica de medida. Entretanto, foi Haupin (1960) utilizou pela primeira vez o método do fio quente na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos, e seu trabalho formou a base de todas as variantes do método. (Santos, 2002).

Alguns cuidados devem tomados ao se trabalhar com o método do fio quente para garantir resultados com a máxima exatidão e consistência:

1. utilizar uma resistência elétrica fina, que se aproxime o máximo possível da fonte de calor linear teórica;
2. buscar o melhor contato possível entre a amostra e a resistência elétrica, reduzindo assim os efeitos da resistência de contato;
3. limitar o tempo de ensaio para assegurar que o tamanho da amostra não afete as temperaturas medidas. (Santos, 2002).

É possível obter o valor da condutividade térmica através do método de placa quente protegida, aplicável em material poroso termicamente homogêneo, que são aquelas que não são afetadas pelo gradiente de temperatura, espessura ou área da amostra (Moura, 1993).

O equipamento é constituído por uma placa de aquecimento central que é denominada placa quente e dispostas simetricamente sobre esta há as amostras e as placas de refrigeração denominadas de placas frias (Moura, 1993).

A coleta de dados neste experimento consiste em medir a temperatura na placa quente e na placa fria, conhecer as medidas das espessuras e o fluxo de calor no material a ser ensaiado.

Capítulo 4

MÉTODO DE MEDIÇÃO E APARATO EXPERIMENTAL

Este capítulo destina-se à apresentação detalhada do aparato experimental desenvolvido para a determinação da condutividade térmica aparente em solos em função das condições psicrométricas do ambiente circundante.

O princípio de funcionamento deste aparato consiste basicamente em medir através do método do fio quente a condutividade térmica em diferentes posições de uma amostra de solo submetida a condições ambientais controladas.

O aparato experimental compõe-se de uma caixa em acrílico para acomodar a amostra de solo, onde em seu interior foram colocados arames de nicromo (Níquel e Cromo) para servirem de fonte de calor e de uma balança para medir as variações mássicas da amostra como consequência das variações climáticas da vizinhança. Este conjunto caixa-balança é posicionado dentro de uma câmara climatizada que simula as condições climáticas do ambiente externo ao solo. O aparato é completado com o sistema de aquisição de dados e a fonte geradora de corrente e tensão elétrica ajustável.

Este capítulo inicia-se com a descrição do método do fio quente, na sequência é apresentado o procedimento de medição adotado, seguindo-se com o detalhamento do aparato experimental e do cálculo das incertezas de medição.

4.1 Método fio quente

No método do fio quente a condutividade térmica aparente é calculada a partir de medições em regime transiente de temperatura gerado por uma fonte de calor ideal, suficientemente longa e fina para que a condição de dissipação unidimensional possa ser considerada (Santos, 2002).

Este método é caracterizado pela sua facilidade de implementação, rapidez na aquisição de dados e baixo custo de implantação e operação. Devido a estas características e também pelo fato de apresentar bons resultados na determinação da condutividade térmica aparente de materiais porosos, este método foi o escolhido para a realização dos ensaios. Entretanto, este método não é indicado para materiais com condutividade térmica elevada ou para a situação onde a diferença de temperatura no aquecimento é alta (Santos, 2002).

No experimento desenvolvido neste trabalho, foi utilizado um arame de nicromo semelhante ao que é empregado na confecção de resistência elétrica, como fonte de calor. A geração de calor ocorre devido ao efeito Joule, uma vez que este arame é alimentado por uma fonte de corrente elétrica cujo valor é determinado pelo sistema de aquisição de dados. O valor da corrente elétrica deverá ser baixa para produzir uma potência elétrica de baixa intensidade que induz uma pequena variação de temperatura do solo reduzindo a migração de umidade provocada pelo aquecimento. A taxa de variação desta temperatura é proporcional às propriedades térmicas do solo.

Para se calcular a condutividade térmica utilizando o método do fio quente é preciso considerar que a fonte térmica linear começa a gerar calor no instante $t = t_0$, no interior de um meio infinito que se encontra inicialmente na temperatura $T = T_0$. Para instantes de tempo posteriores a t_0 e para distâncias radiais, r , próximas à fonte linear, o acréscimo na temperatura apresenta a seguinte dependência com o tempo (Bejan, 1993):

$$T_1(t) - T_0 = \frac{q'}{4\pi\lambda} \ln(t) \quad (4.1)$$

onde o termo à esquerda da equação representa a variação da temperatura que ocorre na resistência elétrica, q' é a densidade linear de potência [W/m], t corresponde ao tempo de aquecimento a ser medido [s] e λ é a condutividade térmica do meio [W/mK].

Para a formulação matemática do método, o fio quente é assumido ser uma fonte de calor ideal (massa nula, portanto a capacidade térmica também nula), infinitamente longa e fina (diâmetro nulo), a qual é circundada até o infinito pelo material cuja condutividade térmica pretende-se determinar. Ao passar uma corrente elétrica constante através do fio, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento (densidade linear de potência), é liberada pelo fio e vai se propagar através do material. O aumento da temperatura do fio será função das propriedades térmicas do meio e do intervalo de tempo de acordo com a Equação 4.1.

Da Equação 4.1 obtém-se a equação para o cálculo da condutividade térmica:

$$\lambda = \frac{q'}{4\pi} \frac{\ln(t)}{T_i(t) - T_0} \quad (4.2)$$

No enfoque experimental tradicional são medidas, portanto, as temperaturas T_i em diferentes instante de tempo t_i , i.e. (T_i, t_i) , $i = 1, 2, \dots$ onde i é o número total de medidas experimentais, e a partir do ajuste por mínimos quadrados dos pontos $(\ln t_i, T_i)$ obtém-se o coeficiente angular da reta, calculando-se então a condutividade térmica do material.

4.2 Procedimento de medição

O aparato montado teve como objetivo medir a variação de temperatura no interior da amostra de solo causada pelo aquecimento da resistência. O aquecimento da resistência elétrica foi obtido através da passagem de uma corrente elétrica i , fornecida por uma fonte ligada por um determinado tempo, variando de 15 minutos à 30 minutos, sendo desligada em seguida por um tempo de aproximadamente 60 a 150

minutos para proporcionar o resfriamento da resistência elétrica. O controle do tempo de duração de cada ciclo foi realizado de forma automática através do programa *Labview*®, deste modo, o experimento pôde ser realizado por longos períodos sem a necessidade de acompanhamento. Esta prática resultou em ciclos de aquecimento e resfriamento na amostra que foram coletados através do sistema de aquisição de sinal e que posteriormente foram processados para se obter o valor da condutividade térmica aparente. Os valores obtidos nos ciclos demonstraram boa repetibilidade do método.

Para a coleta das temperaturas para o cálculo da condutividade térmica, foram fixados termopares do tipo T (cobre-constantan) diretamente sobre a superfície do fio aquecedor. Esperava-se que o sistema de aquisição de sinais que possui uma alta rejeição de modo comum pudesse realizar medições de temperatura, o qual é submetido a uma diferença de potencial de aproximadamente 1,5V, sem a existência de interferências ou ruídos de medição. Uma alta rejeição de modo comum do sistema de medição significa que o equipamento mediria somente a tensão diferencial existente em seus terminais, independente do nível de tensão somada a estes terminais. Observou-se, no entanto, a presença de ruídos e desvios sistemáticos dos valores lidos. Para minimizar este problema procuraram-se algumas soluções elétricas de aterramento que não apresentaram resultado. Optou-se então pela isolação da superfície da resistência elétrica com a aplicação de um verniz isolante elétrico evitando o contato elétrico direto entre o termopar e a resistência. Com a adoção deste método as medições apresentaram níveis de ruído compatíveis com o esperado pelo sistema de aquisição de dados.

Variações nas condições climáticas do ambiente externo ao solo (temperatura e umidade relativa do ar) e no intervalo de medição foram efetuadas para verificar o comportamento da condutividade térmica do solo quanto a estes parâmetros. O objetivo futuro é realizar medições de transferência de massa e calor em condições transientes e se obter por métodos inversos a determinação de outras propriedades de transporte.

Os intervalos de aquecimento e de resfriamento foram realizados para que a temperatura da amostra atingisse a estabilidade tanto na temperatura superior quanto na temperatura inferior.

Os valores de tensão e de corrente elétrica selecionada e medida, fornecem os valores de densidade linear de potência, visto que o comprimento da resistência não se altera durante o experimento. Os baixos valores de tensão e de corrente elétrica utilizados possibilitam acréscimos da temperatura inferiores a 1K, de forma a não provocar desvios muito significativos da condutividade térmica e não comprometer as características do solo devido ao ciclo de aquecimento.

Para conseguir atingir condições de ensaio previamente estabelecidas, a caixa contendo a amostra de solo foi colocada no interior de uma câmara climatizada, capaz de simular ambientes diversos em seu interior, com temperatura e umidade relativa controladas. Esse equipamento consiste num compartimento de 2,5m x 3,5m x 3,0m, cujo fornecimento de ar nas condições desejadas é conseguido por meio de um sistema de condicionamento de ar composto de duas unidades condensadoras externas à câmara, com capacidade total de 8,73 kJ/s (29.800 BTU/h), que opera na faixa de 10°C a 60°C e umidade relativa no interior da câmara variando de 20% a 60%. O ar é conduzido por meio de dutos a *dampers*, que possuem regulagem de inclinação de acordo com o fluxo necessário e que são controlados por CLP, sendo insuflado pelo teto com velocidade de aproximadamente 3m/s, e retornado pelo piso. Como último estágio existem duas resistências que aquecem o ar de insuflamento se necessário.

O conteúdo de umidade e a temperatura da amostra de solo foram modificados a partir das mudanças nas condições climáticas do ambiente circundante, simuladas pela câmara climatizada. Observou-se que a estabilização da temperatura ocorreu em menos tempo do que a do conteúdo de umidade. Estas diferenças já eram esperadas, pois já haviam sido previstas durante a simulação no programa de simulação higrótérmica e energética de ambientes, *PowerDomus*®. De acordo com este programa, para o tamanho da amostra empregada no presente trabalho, o período para atingir o equilíbrio do valor do conteúdo de umidade no solo seria de aproximadamente 720 h, ao passo que para a temperatura seria de 72 h. Os dados obtidos para este material serviu de motivação para se trabalhar em condições de teste em regime transiente, obtendo-se assim medidas relativamente rápidas quando comparadas às de regime permanente que são usualmente utilizadas. Além disso, esta simulação permitiu

estabelecer valores aproximados dos gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade durante a realização dos ensaios.

Um dos inconvenientes do método transiente é a necessidade de se conhecer o intervalo de tempo para ocorrer uma determinada variação da temperatura na resistência. Este problema foi contornado com a implementação do controle de tempo no *software LabView®*, que realizou o controle do período de aquecimento e resfriamento da fonte de calor.

Para a execução dos ensaios foi confeccionada uma caixa de acrílico contendo resistências e termopares, onde depositou-se a amostra de solo. O uso do acrílico foi com a intenção de evitar a migração de umidade através das paredes do recipiente, pois caso fosse confeccionada em madeira, esta demoraria para secar e desta forma interferir nas condições do ensaio. As principais dimensões desta caixa estão representadas na figura 4.1. No seu interior foram fixados arames de aço ligados em série para servirem de fonte de calor quando alimentados por uma corrente elétrica, conforme mostrado na figura 4.1. Em cada resistência foi fixada dois termopares, esta opção foi feita por motivo de segurança na aquisição dos valores da temperatura. Também foram ligados fios elétricos para a medição da tensão elétrica em cada resistência assim como para a medição da corrente elétrica. As resistências foram dispostas no centro da caixa, tendo um alinhamento vertical e com um espaçamento de 40mm entre cada uma delas. Apresenta-se na Tabela 4.1 as posições das resistências elétricas e conseqüentemente da medição da condutividade térmica a partir da superfície do solo.

Tabela 4.1 – Posicionamento das resistências elétricas para a medição da condutividade térmica

Denominação da resistência	Posição a partir da superfície
R_1	$Z_1 = 48 \text{ mm}$
R_2	$Z_2 = 88 \text{ mm}$
R_3	$Z_3 = 128 \text{ mm}$

A altura da amostra no interior do recipiente é de 160 mm, conforme pode ser observado na figura 4.1.

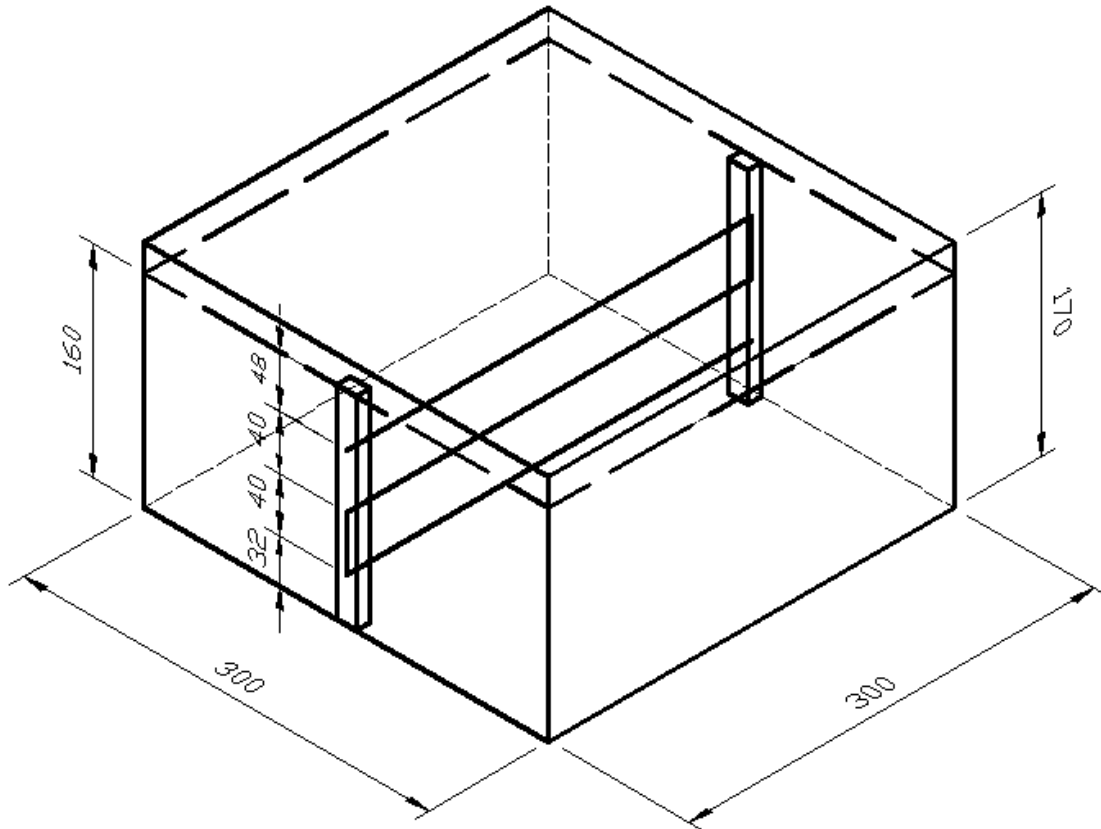


Figura 4.1 – Principais dimensões da caixa de ensaios

Os valores das dimensões da caixa de ensaios foram definidos de forma a garantir as condições de amostra infinita para a fonte de calor considerada, satisfazendo deste modo as condições de ensaio necessárias para o método do fio quente.

Para comparação, foram também utilizadas sondas da marca DECAGON que realizam a medição das propriedades dielétricas do meio para a obtenção do conteúdo de umidade e da temperatura da amostra de solo. Com isto esperava-se determinar os gradientes de conteúdo de umidade no solo com uma melhor aproximação. A

desvantagem do método de resistência em relação a este último é que ele necessita estabelecer um gradiente de temperatura no solo, embora pequeno, mas que perturba a condição do solo alterando o valor lido. Como é realizado o aquecimento, a tendência é que se obtenham valores de conteúdo de umidade um pouco inferiores ao que existiriam se não houvesse a perturbação desta sonda.

A figura 4.2 representa o esquema de montagem elétrica do aparato experimental desenvolvido, onde as tensões são medidas em paralelo em cada resistência, e a corrente elétrica, pelo fato das resistências estarem ligadas em série e também por serem todas idênticas, é considerada constante ao longo de toda a extensão.

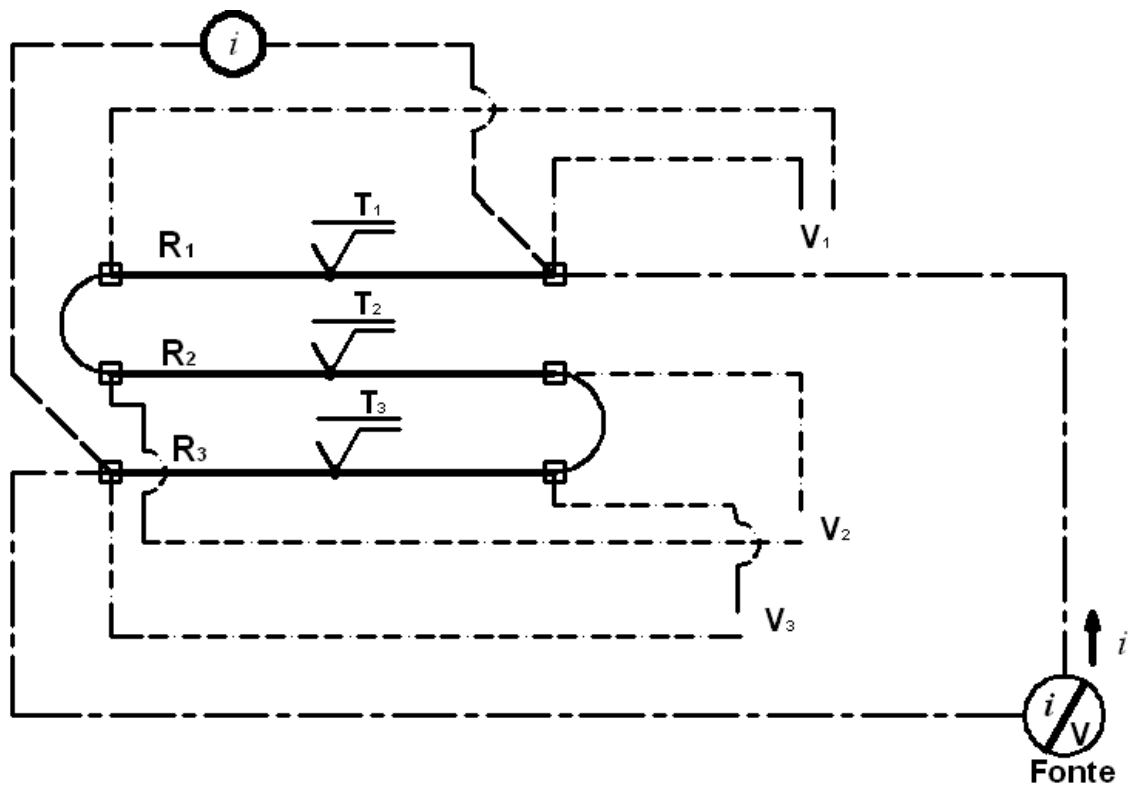


Figura 4.2 – Esquema da montagem elétrica

No diagrama representado na figura 4.2 são mostradas as ligações realizadas para coletas dos valores das temperaturas T_1 , T_2 e T_3 , das tensões elétricas V_1 , V_2 e V_3

e do valor da corrente elétrica i . Estes fios foram ligados ao módulo do sistema de aquisição de dados demonstrado na figura 4.3.



Figura 4.3 – Módulo de aquisição de dados

Este módulo é acoplado no sistema de aquisição de sinais que envia os valores coletados para serem armazenados em planilhas eletrônicas no computador.

Na figura 4.4 é mostrada uma ilustração real dos elementos que compõem o aparato experimental para a determinação da condutividade térmica em solo: a caixa de acrílico com os respectivos sensores de temperatura e conteúdo de umidade, a fonte onde são regulados os valores de corrente e tensão elétrica e o sistema de aquisição de dados.

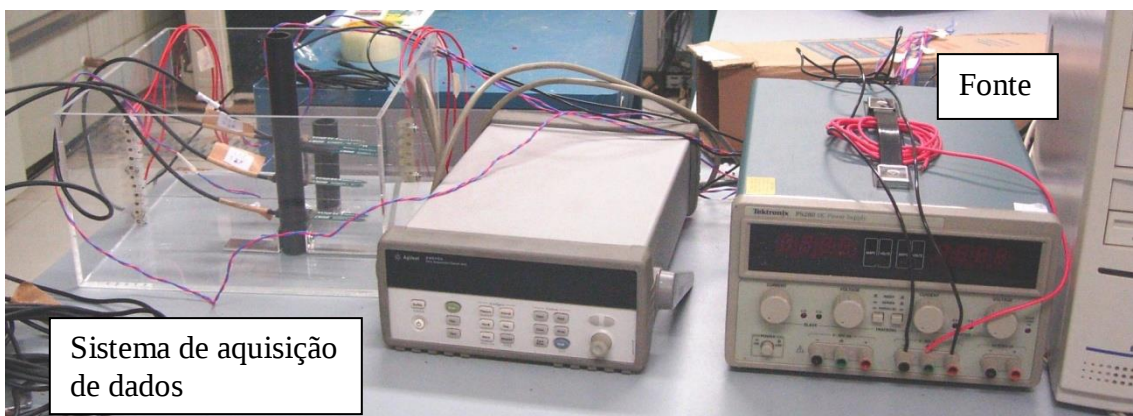


Figura 4.4 – Sistema de aquisição de dados e a fonte geradora de tensão e corrente elétrica.

Na Figura 4.5 é representada a caixa em acrílico com os cabos, resistências, sensores de conteúdo de umidade e temperatura e termopares montados. Nota-se que os sensores de conteúdo de umidade foram posicionados com auxílio de um dispositivo tubular para que permanecesse na mesma altura das resistências.

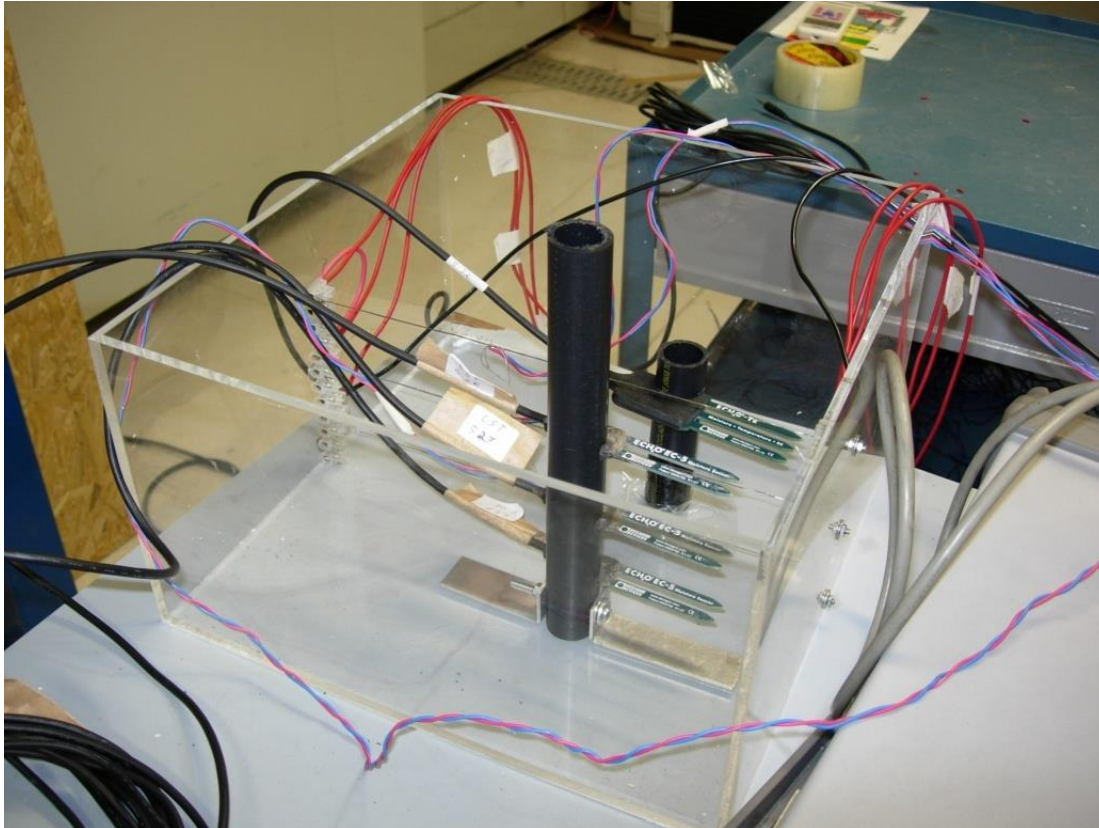


Figura 4.5 – Caixa de ensaios com os sensores de temperatura.

Nota-se, ainda, que a colocação das resistências, termopares e sensores foram todas feitas de modo que estes ocupassem a parte central da caixa. O objetivo deste procedimento foi de assegurar que as alterações nas propriedades termofísicas na amostra seriam somente em função das mudanças das condições na superfície e não as oriundas das paredes da caixa.

Na figura 4.6 apresenta-se a caixa posicionada em uma balança para a medição do aumento ou a perda de massa conforme o acréscimo ou retirada de umidade do

solo. Em função das dimensões da caixa e conseqüentemente da sua massa, foi necessário utilizar uma balança de grande capacidade, no caso, de 20 kg, mas que não apresentava a possibilidade de ser conectada ao sistema de aquisição de dados. Devido a este fato, os valores foram anotados manualmente com intervalos de medição, em média, de 48 horas. Deste modo, não foi possível relacionar de modo contínuo a variação da massa com o valor da condutividade térmica do solo.

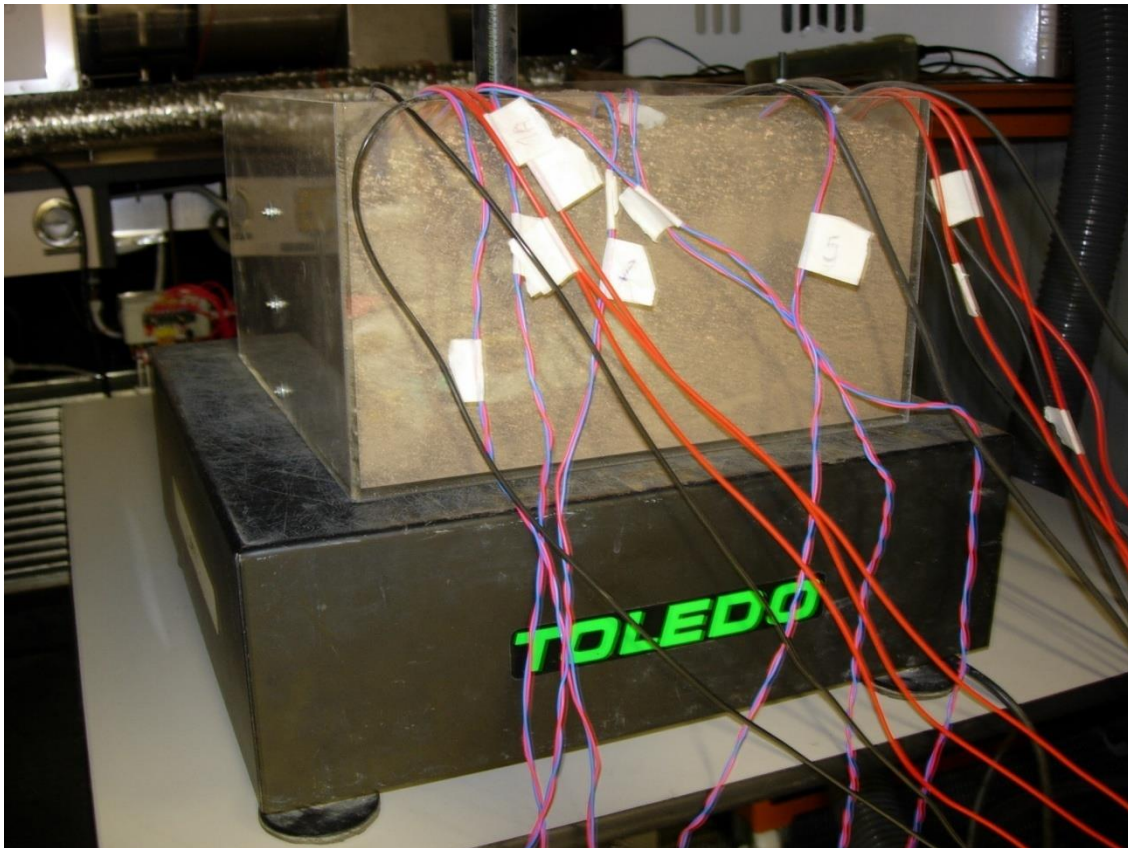


Figura 4.6 – Conjunto caixa-balança com a amostra de solo na câmara climatizada

Alguns cuidados foram observados durante o ciclo de aquecimento e de resfriamento nas resistências para que uma variação elevada da temperatura ou um menor tempo de resfriamento não provocasse alterações nas propriedades da amostra de solo. Para reduzir os gradientes de calor e massa devido ao aquecimento procurou-se operar com acréscimos de temperatura não superiores a 1K. Esta sensibilidade do

sistema é função da baixa inércia térmica do conjunto, quando comparada a sensores comerciais.

4.3 Análise de erros

Na aquisição dos valores de uma medição em um aparato experimental, os resultados encontrados necessitam ser apresentados de modo a possibilitar que os erros presentes em todas as variáveis possam ser quantificados e expressos no resultado. Este procedimento é necessário para que as comparações com os resultados já existentes, tanto teóricos quanto obtidos por outros modos experimentais possam ser realizadas.

O procedimento para determinar as incertezas existentes e desta forma apresentar o resultado deve considerar a parcela de cada variável na formação da incerteza da grandeza a ser mensurada.

Quando um parâmetro a ser medido (G) é uma variável dependente de uma expressão analítica, onde as variáveis independentes ($x_1, x_2, \dots, x_n$) são determinados por diferentes sistemas de medição e, portanto, possuem incertezas de medição, a incerteza total de medição da variável dependente devido às incertezas de x_i é dado, em valores relativos, pela Equação 4.3 (Taylor, 1988):

$$\frac{IMG}{G} = \pm \sqrt{\left| \frac{(IMG)_{x_1}}{G} \right|^2 + \left| \frac{(IMG)_{x_2}}{G} \right|^2 + \dots + \left| \frac{(IMG)_{x_n}}{G} \right|^2} \quad (4.3)$$

onde $\frac{(IMG)_{x_i}}{G}$, são as incertezas relativas relacionadas às grandezas x_i , as quais são obtidas pela Equação 4.4:

$$\frac{(IMG)_{x_i}}{G} = \frac{\partial G}{\partial x_i} \frac{IMx_i}{G} \quad (4.4)$$

onde:

$\frac{\partial G}{\partial x_i}$ é coeficiente de sensibilidade associado com a estimativa de entrada x_i , isto é, a derivada parcial da função modelo de G em relação a variável x_i , e IMx_i é a incerteza de medição do parâmetro x_i . O coeficiente de sensibilidade descreve o quanto a estimativa de saída G é influenciada por variações da estimativa de entrada x_i (Pereira, 2003).

Para a determinação do valor da condutividade térmica λ , foram consideradas como variáveis independentes as seguintes grandezas: temperatura (T), tensão elétrica (V), corrente elétrica (i), tempo (t) e comprimento da resistência (L).

Aplicando estas grandezas na Equação 4.3, resulta em:

$$\frac{IM_\lambda}{\lambda} = \pm \sqrt{\left| \frac{(IM_\lambda)_V}{\lambda} \right|^2 + \left| \frac{(IM_\lambda)_i}{\lambda} \right|^2 + \left| \frac{(IM_\lambda)_L}{\lambda} \right|^2 + \left| \frac{(IM_\lambda)_{T_1}}{\lambda} + \frac{(IM_\lambda)_{T_2}}{\lambda} \right|^2 + \left| \frac{(IM_\lambda)_{t_1}}{\lambda} + \frac{(IM_\lambda)_{t_2}}{\lambda} \right|^2} \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 considera que as grandezas T1, T2 e t1 e t2 são correlacionadas.

Da Equação 4.4, obtém-se para cada parcela das variáveis as seguintes condições:

a) Incerteza de medição relativa relacionada à variável tensão elétrica.

$$\frac{(IM_\lambda)_V}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial V} \right| \frac{(IM_\lambda)_V}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_V}{V} \quad (4.6)$$

b) Incerteza de medição relativa relacionada à variável corrente elétrica.

$$\frac{(IM_\lambda)_i}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial I} \right| \frac{(IM_\lambda)_i}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_i}{I} \quad (4.7)$$

c) Incerteza de medição relativa relacionada à variável comprimento da resistência.

$$\frac{(IM_\lambda)_L}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial L} \right| \frac{(IM_\lambda)_L}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_L}{L} \quad (4.8)$$

d) Incerteza de medição relativa relacionada à variável temperatura no início de cada ciclo do ensaio no interior da amostra.

$$\frac{(IM_\lambda)_{T_1}}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial T_1} \right| \frac{(IM_\lambda)_{T_1}}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_{T_1}}{T_1} \quad (4.9)$$

e) Incerteza de medição relativa relacionada à variável temperatura no final de cada ciclo do ensaio no interior da amostra.

$$\frac{(IM_\lambda)_{T_2}}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial T_2} \right| \frac{(IM_\lambda)_{T_2}}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_{T_2}}{T_2} \quad (4.10)$$

f) Incerteza de medição relativa relacionada à variável tempo inicial do ensaio.

$$\frac{(IM_\lambda)_{t_1}}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial t_1} \right| \frac{(IM_\lambda)_{t_1}}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_{t_1}}{t_1 \ln \left(\frac{t_1}{t_0} \right)} \quad (4.11)$$

g) Incerteza de medição relativa relacionada à variável tempo final do ensaio.

$$\frac{(IM_\lambda)_{t_2}}{\lambda} = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial t_2} \right| \frac{(IM_\lambda)_{t_2}}{\lambda} = \frac{(IM_\lambda)_{t_2}}{t_0^2 \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} \quad (4.12)$$

Substituindo os termos dos coeficientes de sensibilidade determinados substituindo-os na Equação 4.5, tem-se:

$$\frac{IM_\lambda}{\lambda} = \pm \sqrt{\left(\left(\frac{(IM_\lambda)_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{(IM_\lambda)_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{(IM_\lambda)_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{(IM_\lambda)_{T_1}}{T_1} + \frac{(IM_\lambda)_{T_2}}{T_2} \right)^2 + \left(\frac{(IM_\lambda)_{t_1}}{t_1 \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} + \frac{(IM_\lambda)_{t_0}}{t_0^2 \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} \right)^2} \quad (4.13)$$

Na Equação 4.13 agrupam-se os termos dos coeficientes de sensibilidade para determinar o valor da incerteza de medição no cálculo da condutividade térmica aparente da amostra de solo.

Tabela 4.2 – Valores da incerteza de medição das variáveis utilizadas

Grandeza	Instrumento de aquisição	IM	Faixa de leitura (Max)
Temperatura relativa	HP / Termopar T	$\pm 1,5^\circ\text{C}$	$< 35^\circ\text{C}$
Tensão elétrica	HP	$\pm 0,1 \text{ V}$	$< 1 \text{ V}$
Corrente elétrica	HP	$\pm 0,4 \text{ mA}$	$< 0,25 \text{ A}$
Tempo de ensaio	Computador/Labview®	$\pm 0,01 \text{ s}$	
Comprimento da	Escala	$\pm 0,5 \text{ mm}$	

resistência

Fonte: Agilent 34970A - Data Acquisition/Switch Unit.

Capítulo 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com a amostra de solo do tipo aluvião-arenoso, empregando-se o aparato experimental descrito no capítulo precedente.

O tipo de solo aluvião-arenoso é caracterizado pela riqueza em materiais orgânicos de origem vegetal principalmente os situados na região tropical (Vaz, 1996). Este solo, quando no estado *in situ*, apresenta granulometria heterogênea e composição química variada. Porém, a amostra utilizada no presente trabalho foi preparada para apresentar uma boa homogeneidade na porosidade e granulometria.

A condutividade térmica foi obtida a partir de medições da variação da temperatura em função do tempo realizadas em três profundidades distintas da amostra de solo (vide Figura 4.1). A fim de se determinar a sensibilidade da condutividade térmica em relação às condições climáticas externas ao solo foram variadas as propriedades psicrométricas do ambiente circundante conforme indicado na Tabela. 5.1

Tabela 5.1: Condições psicrométricas do ambiente externo.

Ensaio	Umidade Relativa [%]	Temperatura [°C]
1	60	30
2	60	25
3	60	20
4	60	15

5	20	25
---	----	----

A Figura 5.1 ilustra o transiente de temperatura obtido durante o ciclo de aquecimento em umas das três resistências elétricas. Para as outras duas resistências o comportamento do perfil da temperatura foi semelhante e por este motivo não são mostrados.

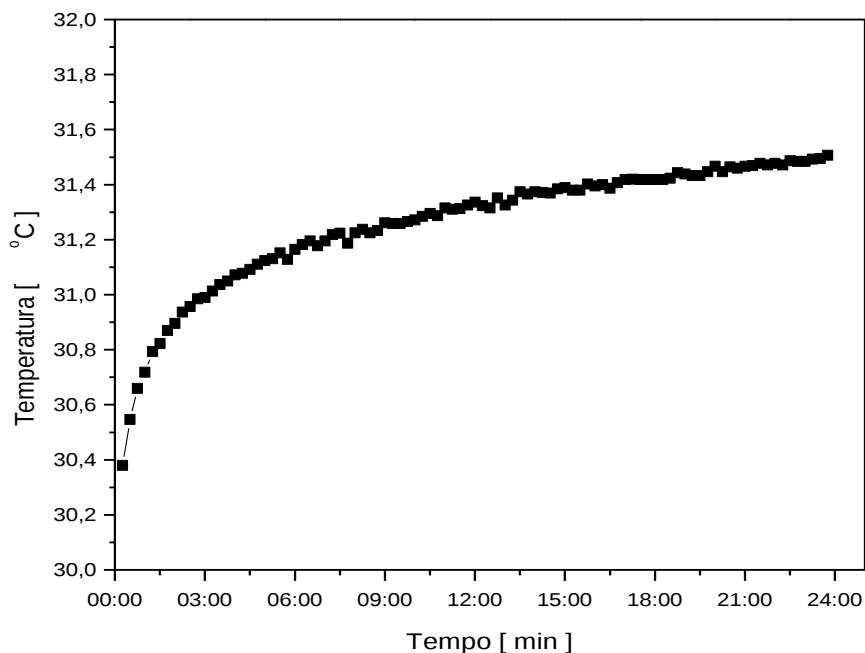


Figura 5.1 – Perfil temporal de temperatura durante o ciclo de aquecimento da resistência R1($x_1 = 48\text{mm}$).
 $T = 30^\circ\text{C}$ e UR = 60%.

Observa-se na figura que a duração do ciclo de aquecimento é de aproximadamente 15 min, e que o sistema apresenta uma resposta em temperatura logarítmica no tempo, em acordo com a Equação 4.1.

Dessa forma, a condutividade térmica da amostra de solo pode ser obtida através da linearização da curva representada na Figura 5.1, sendo o coeficiente angular da reta. Este procedimento resulta na curva apresentada na Figura 5.2.

Da análise da Equação 4.2, nota-se que a densidade linear de potência pode ser considerada constante, logo, a condutividade térmica apresenta dependência apenas da variação da temperatura e do intervalo de tempo. Se a amostra apresenta uma variação de temperatura pequena próxima da resistência, quando submetida a um pulso de calor, representa que este solo apresenta boa capacidade para dissipar calor, ou seja, possui boa condutividade térmica.

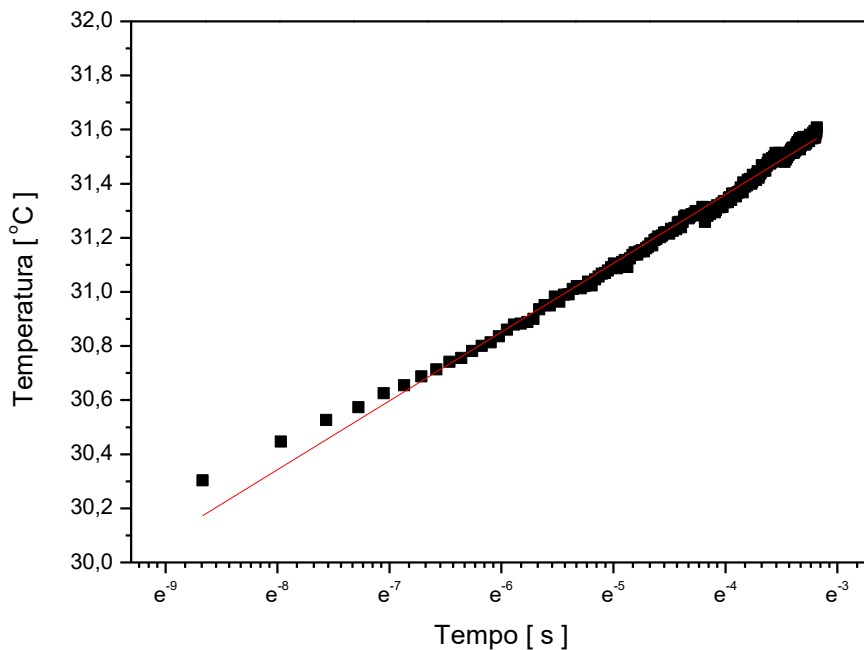


Figura 5.2 – Curva linearizada do perfil temporal de temperatura durante o ciclo de aquecimento da resistência R1 ($x_1 = 48$ mm)

UR= 60 % e $T=30^{\circ}\text{C}$.

Os resultados obtidos em termos de condutividade térmica aparente são então apresentados nas seções subseqüentes em três estudos diferentes: a) avaliação da influência da profundidade do material; b) avaliação da influência das condições climática do ambiente externo e c) avaliação da influência do conteúdo de umidade na condutividade térmica do solo.

A influência da profundidade será avaliada através dos dados obtidos das três resistências que estão posicionadas em alturas diferentes em relação à superfícies, as demais condições serão obtidas a partir dos ajustes de temperatura e umidade relativa no interior da câmara climatizada.

5.1 Avaliação da influência da profundidade do material

Nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 são apresentados os valores de condutividade térmica aparente medida em diferentes profundidades da amostra de solo, $X_1 = 48$ mm, $X_2 = 88$ mm e $X_3 = 128$ mm, (ver Figura 4.1), para os ensaios 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

O intervalo de tempo indicado representa apenas o tempo de coleta dos dados e não o tempo total de ensaio. Considera-se como tempo total de ensaio, o tempo da fase de estabilização da temperatura acrescido do tempo de coleta de dados.

Durante o período de coleta de dados, em média, a cada duas horas de ensaio foi levantado um valor da condutividade térmica. Este procedimento foi adotado após observar que as variações nos valores encontrados para a condutividade térmica eram pequenas para este intervalo de tempo.

Devido ao fato da câmara ter sido utilizada por outros grupos de trabalho, ela foi desligada por alguns dias para que o interior da câmara estabilizasse nas condições ambiente.

Quando a câmara foi novamente ligada, esta foi ajustada para 25°C e 50% de umidade relativa. Com este procedimento foi possível verificar as condições de funcionamento do equipamento e ter uma idéia da taxa de aquecimento e resfriamento e o tempo necessário para obter determinado valor de umidade relativa.

No primeiro ajuste da temperatura e umidade relativa foram utilizados os valores 40°C e 75%. Entretanto, devido a capacidade da câmara, não foi possível atingir o valor estabelecido de umidade relativa, sendo esta então alterada para 60%.

Após a estabilização da umidade relativa em 60%, a temperatura no interior da câmara foi ajustada para 30°C. Na sequência esperou-se que estabilidade nas condições da amostra fosse atingida; esse processo demorou aproximadamente 720 horas. Ao ser atingida a estabilidade na amostra foi realizada a coleta dos dados utilizados para o cálculo da condutividade térmica.

No segundo ensaio, foi mantido o valor da umidade no interior da câmara e a temperatura foi abaixada para 25°C e os mesmos procedimentos realizados no ensaio anterior foram repetidos. Nas outras duas situações de ensaio (20°C e 15°C) os procedimentos feitos no ensaio 1 foram repetidos.

Para a realização do 5º ensaio, a umidade relativa no interior da câmara foi alterada para 20% e a temperatura ajustada em 25°C. Este procedimento teve como objetivo analisar a influência da umidade relativa do ambiente na condutividade do solo. Este experimento necessitou de um intervalo maior de tempo para atingir a estabilização, pois, a variação da umidade no solo ocorre de modo lento, conforme havia sido previsto na simulação no programa *PowerDomus*®.

Na Figura 5.3 apresentam-se os valores de condutividade térmica medidos nas diferentes profundidades da amostra nas condições climáticas do ensaio 1.

Observa-se que na resistência 1 ($X_1=48$ mm) o valor da condutividade é maior quando comparado com o das duas resistências que se encontram a uma profundidade mais abaixo. Pode-se explicar este fato pela proximidade desta resistência com a superfície do solo e também pelo fato da amostra estar em meio onde a umidade relativa do ar não se encontrava estável. Outros fatores que contribuíram para variações nas medidas foram as condições de isolamento das resistências, os contatos dos termopares e a porosidade não ser igual em toda a amostra. Estes resultados apresentaram-se, no entanto, coerente com os valores obtidos por Zhang, et al. (2006) e Carpentier, et al. (2007), porém, deve ser considerada que as condições dos ensaios não são exatamente as mesmas.

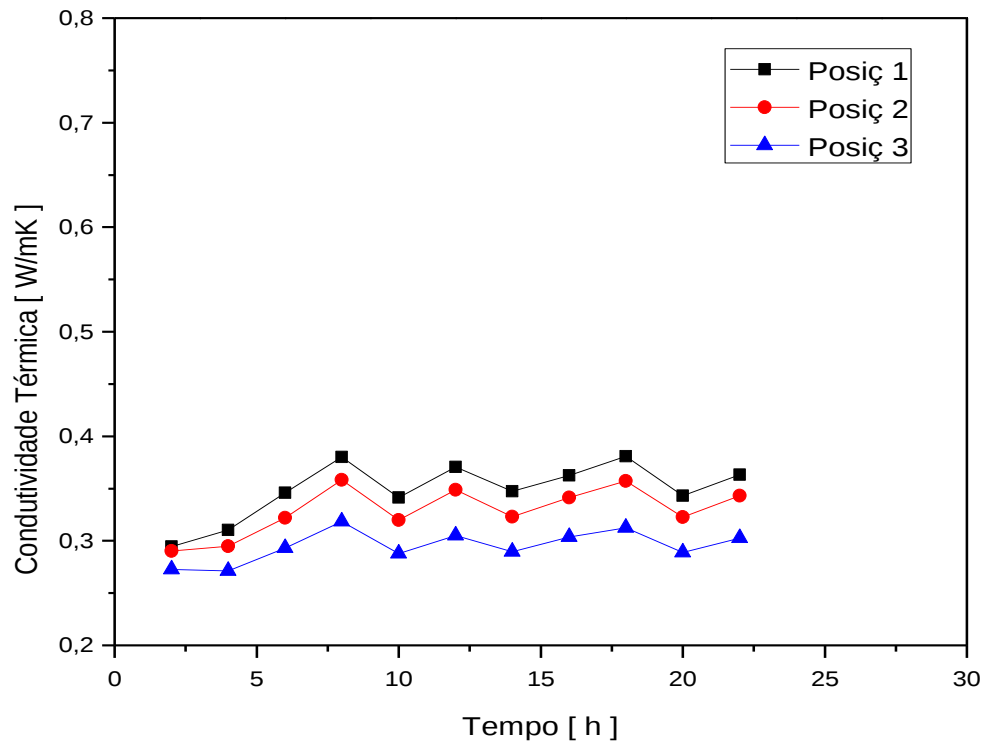


Figura 5.3 – Variação da condutividade térmica aparente com o tempo para o ensaio 1,

UR = 60% e $T = 30^{\circ}\text{C}$.

A oscilação que é observada na parte inicial do ensaio pode ser creditada a esta corresponder à fase de transição nos valores de ajustes de temperatura e umidade. Este comportamento pode ser relacionado ao fato das condições impostas não terem atingidas os valores estabelecidos. Na fase final do ensaio pode se notar uma tendência a estabilização do valor da condutividade térmica, que se aproxima do valor médio das leituras realizadas.

As medições da condutividade térmicas apresentaram valores diferentes de uma resistência para outra, porém com comportamentos semelhantes, este fato indica que o aparato apresenta uma boa estabilidade na coleta de dados.

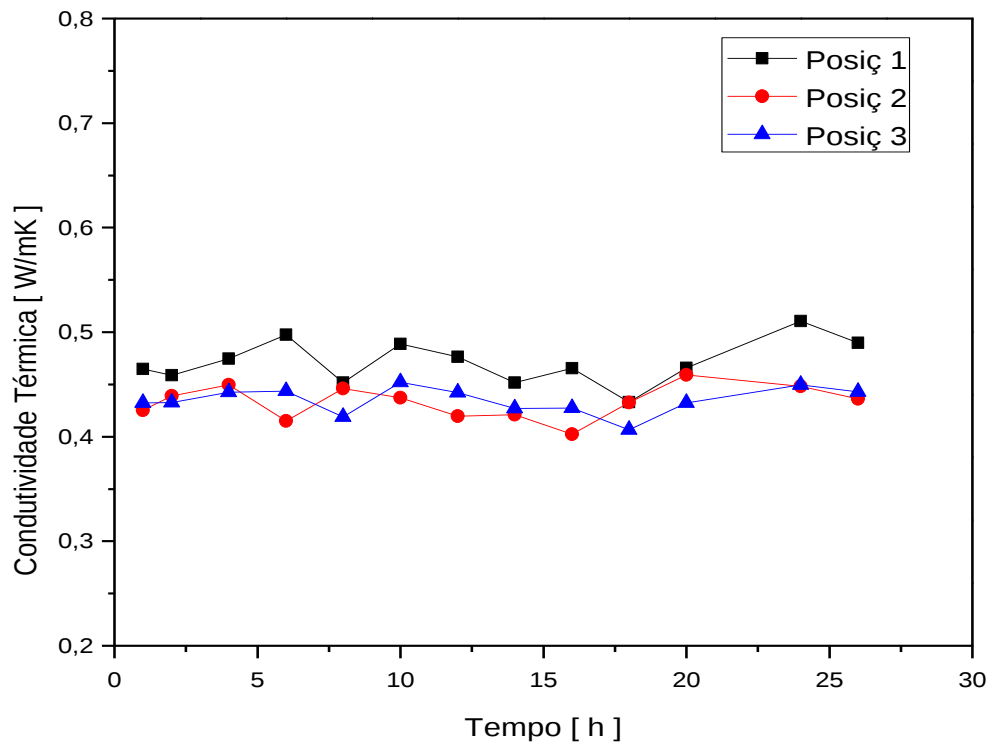


Figura 5.4 – Variação da condutividade térmica aparente com o tempo para o ensaio 2,

UR = 60% e T = 25°C.

Na figura 5.4 é representado o comportamento da condutividade térmica para o ensaio 2, que apresenta uma nova condição psicrométrica (UR = 60% - T = 25°C), pode-se observar que apesar das curvas apresentarem comportamento irregular, percebe-se que o valor médio da condutividade térmica aumentou em relação ao ensaio representado na Figura 5.3.

Neste ensaio, ao contrário do anterior, não se observa um comportamento regular dos gráficos e para as posições 2 e 3, percebe-se que além de valores muito próximos, eles apresentam oscilações com alternância de valores máximos. Este comportamento pode ser creditado ao fato de a parte do fundo da amostra apresentar conteúdo de umidade e temperatura em fase de estabilização, apesar do intervalo de tempo de aproximadamente 170 horas entre os ensaios.

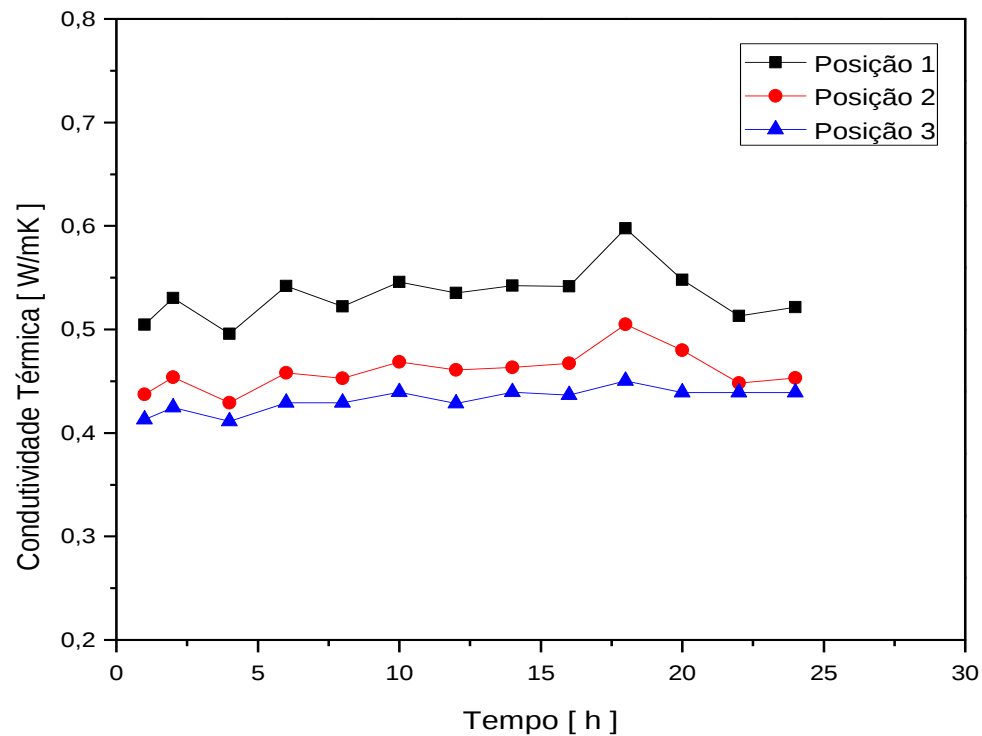


Figura 5.5 – Variação da condutividade térmica aparente com o tempo para o ensaio 3,
UR = 60% e T = 20°C.

Na Figura 5.5 são representados os resultados do ensaio 3, percebe-se que os valores encontrados para cada posição das resistências apresentam-se de forma mais definidas. Em comparação com as condições de ensaio 2, os valores da condutividade térmica para o ensaio 3 (UR = 60% - T = 20°C), apresentam valores maiores, novamente, este fato pode ser creditado pelo o fato da temperatura no interior da amostra ser menor. Esta temperatura menor proporciona menor taxa de secagem do solo e o maior conteúdo de umidade presente contribui para a boa condução de calor neste meio. Este fenômeno foi observado também na condição de ensaio seguinte, onde as propriedades psicrométricas foram modificadas para UR = 60% e T = 15°C.

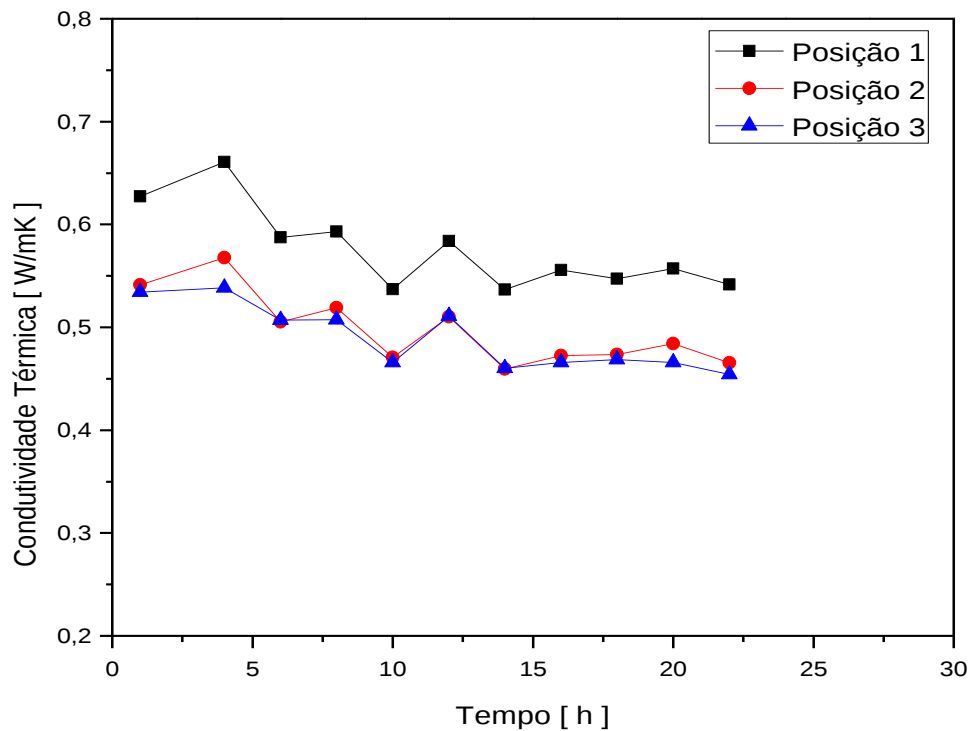


Figura 5.6 – Variação da condutividade térmica aparente com o tempo para o ensaio 4,
UR = 60% e T = 15°C.

A Figura 5.6 representa o ensaio 4 (UR = 60% - T = 15°C), nestas condições, destaca-se o fato dos valores da condutividade térmica medidos na posição 1 serem muito maiores do que os medidos nas posições 2 e 3 que apresentaram valores da condutividade térmicas muito próximas. Este comportamento pode ser devido ao fato da temperatura ajustada não ter provocado alterações no conteúdo de umidade nas posições 2 e 3. Este fato poderia ser corrigido utilizando um intervalo de tempo maior entre os ajustes da temperatura e da umidade no interior da câmara, porém, este procedimento acarretaria em um tempo de ensaio demasiadamente longo.

Pode-se observar que o valor da condutividade térmica do solo diminui com o aumento da profundidade em que se realizam as medições. Porém, deve-se levar em consideração as condições da superfície onde ocorrem as trocas de calor e umidade e também de que forma estes itens são propagados para o interior do solo.

Deve-se considerar que a facilidade com que a temperatura e a umidade são transportadas no solo depende do grau da porosidade e este item muitas vezes não se apresenta de forma homogênea ao longo de uma coluna de solo. As variações podem ocorrer devido à compactação do solo no momento que é colocada na caixa e a granulometria da amostra.

5.2 Avaliação da influência das condições climáticas do ambiente externo

5.2.1 – Influência da umidade relativa do ar

Na Figura 5.7 são comparadas as condutividades térmica medidas nas vizinhanças da resistência 1, avaliadas com variação da umidade relativa do ar no interior da câmara e com a temperatura constante.

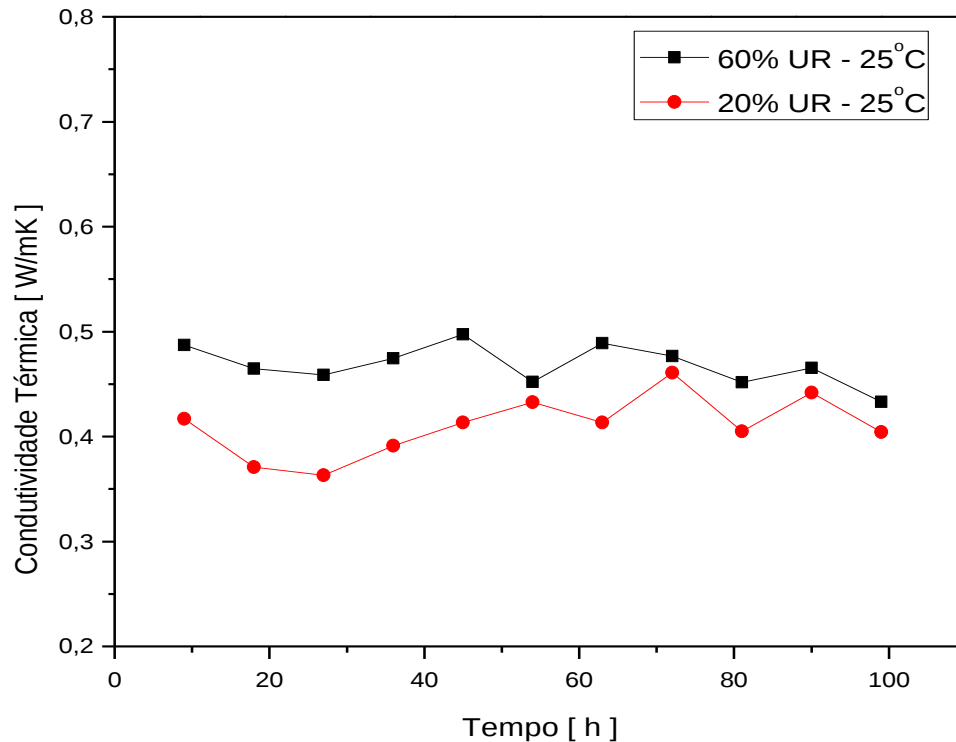


Figura 5.7 – Comparativo entre os valores da condutividade térmica na resistência 1, obtidos nos ensaios 2 (UR = 60% , T = 25°C) 5 (UR = 20% e T = 25°C).

Verificou-se que nas primeiras 48 horas de ensaio, o valor da condutividade térmica nas condições de maior umidade relativa do ar (60%) é maior quando comparado com os valores para a umidade relativa menor (20%). Este comportamento condiz com a teoria onde se afirma que quanto maior o conteúdo de umidade, maior será a condução de calor deste meio. Em relação ao conteúdo de umidade, os sensores inseridos no interior da amostra registraram o valor de $0,013\text{m}^3/\text{m}^3$ nas vizinhanças da resistência 1 e da massa da amostra juntamente com o recipiente igual a 17,608 kg para as condições de 60% de umidade relativa do ar e temperatura de 25°C . Para a outra condição, 20% de umidade relativa e temperatura de 25°C , o conteúdo de umidade passou para $0,006\text{ m}^3/\text{m}^3$ e a massa total da amostra diminuiu para 17,432 kg.

Os dados expostos no parágrafo anterior confirmam as expectativas em relação ao comportamento do valor da condutividade térmica em função do conteúdo de umidade, apesar de em alguns pontos a diferença entre os valores serem pequenas.

No gráfico representado na Figura 5.8, é realizada uma análise semelhante à que foi feita anteriormente, porém com as medições efetuadas na resistência 2.

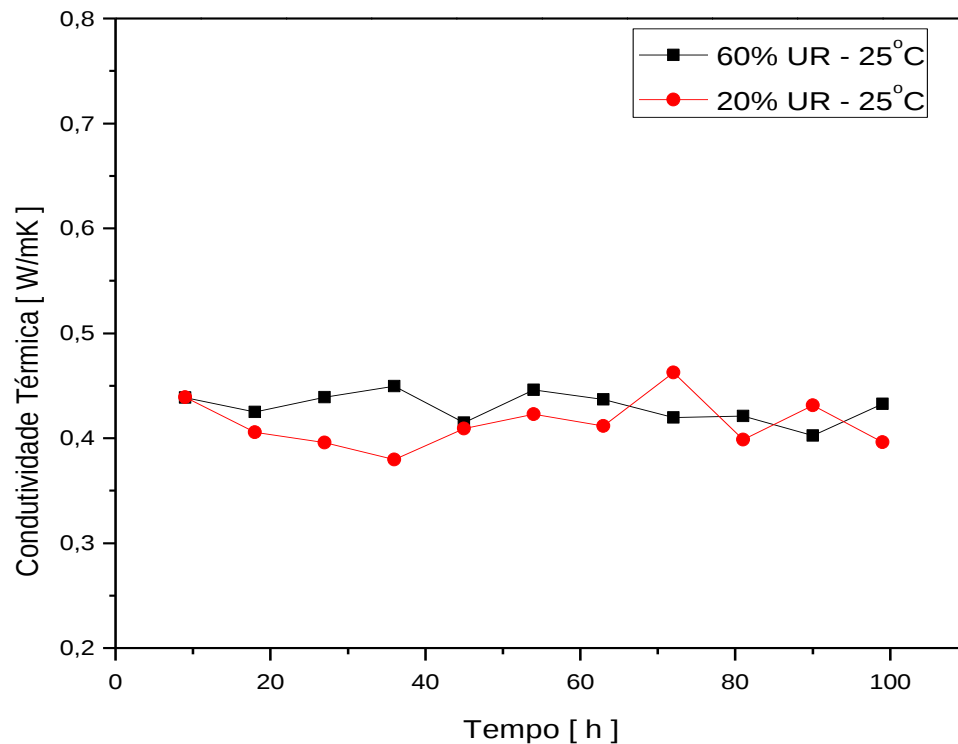


Figura 5.8 – Comparativo entre os valores da condutividade térmica na resistência 2, obtidos nos ensaios 2 (UR = 60% , T = 25°C) 5 (UR = 20% e T = 25°C).

Com as condições de temperatura no interior da câmara e do valor da umidade relativa inalteradas, observa-se que a condutividade térmica avaliada apresenta valores menores quando comparadas com as medidas na resistência 1 e que as diferenças destes valores são menores.

Estes dados indicam que a migração da umidade para o interior da amostra ocorre lentamente, mesmo quando a propagação ocorre a favor da força gravitacional. Neste caso, os sensores indicavam conteúdo de umidade de $0,010 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (60% UR – 25°C) e de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (20% UR – 25°C).

Na Figura 5.9 é apresentado o gráfico que indica o comportamento da condutividade térmica, para as mesmas condições de temperatura e umidade relativa no interior da câmara, medidas na resistência 3.

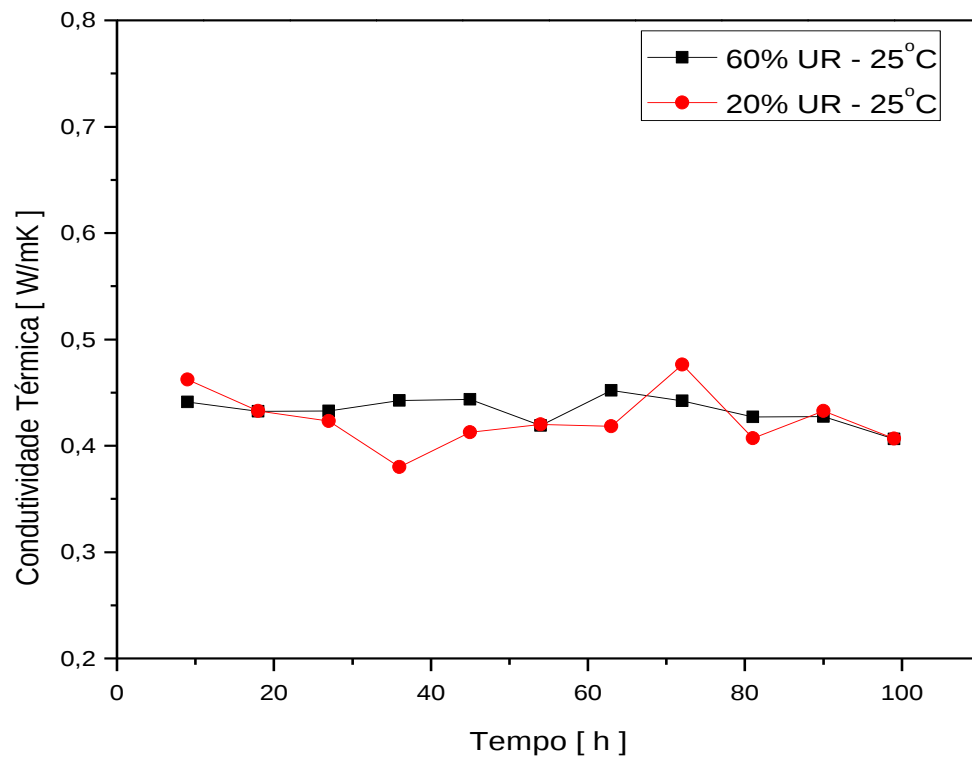


Figura 5.9 – Comparativo entre os valores da condutividade térmica na resistência 3, obtidos nos ensaios 2 (UR = 60% , T = 25°C) 5 (UR = 20% e T = 25°C).

Os resultados obtidos através dos dados coletados na resistência 3 enfatizam a baixa velocidade do deslocamento da umidade para o interior da amostra. O valor do conteúdo de umidade medido foi de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para as duas situações de ensaio após uma semana sob as condições impostas, ou seja, condições externas diferenciadas, principalmente a umidade relativa, principalmente, requer um tempo maior para alterar as condições no interior da amostra.

O valor médio da condutividade térmica da amostra próximo da resistência 3 não difere muito do valor obtido pela resistência 2, isso demonstra que a diferença observada nas massas da amostra é resultado do processo de secagem na região próxima à superfície que é onde se observa uma diferença maior nos valores da condutividade térmica.

5.2.2 – Influência da temperatura do ar

Na sequência do experimento, o valor da umidade relativa do ar no interior da câmara foi mantido constante em 60% e as temperaturas foram ajustadas em 30°C, 25°C, 20°C e 15°C. O conteúdo de umidade no interior da amostra oscilou entre 0,009m³/m³ e 0,010m³/m³.

O objetivo deste procedimento foi o de comparar o efeito da variação da temperatura em relação ao conteúdo de umidade no valor da condutividade térmica do solo.

Na Figura 5.10 é representado o comportamento da condutividade térmica na amostra medida nas vizinhanças da resistência 1.

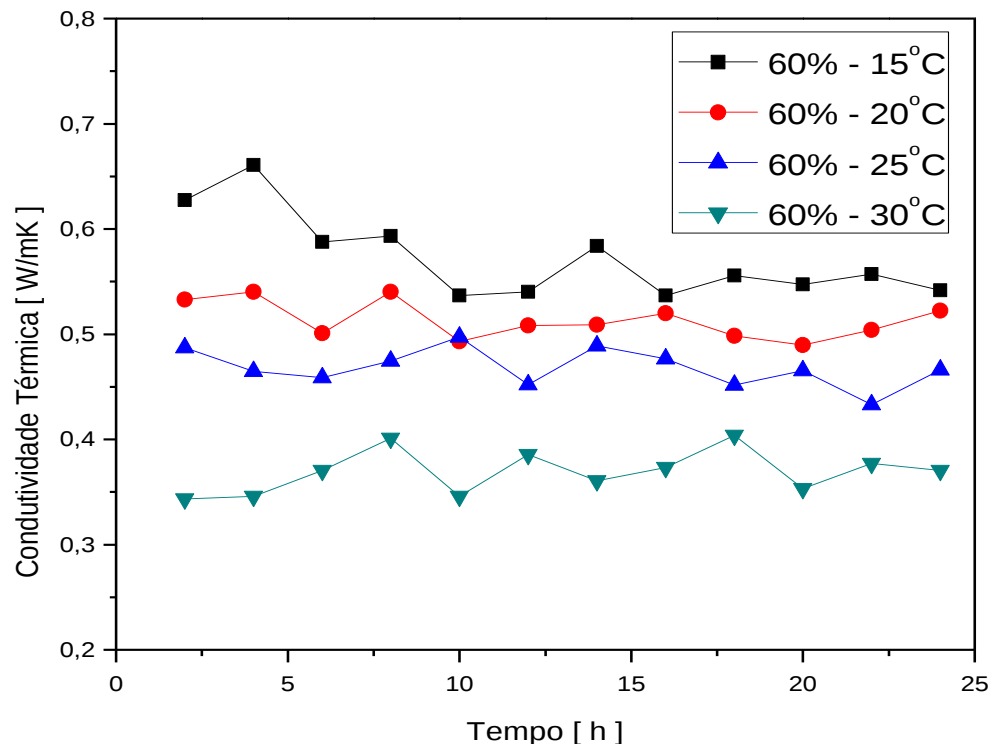


Figura 5.10 – Comparativo entre os valores da condutividade térmica na resistência 1, obtidos com os ensaios 1, 2, 3 e 4.

Observa-se que a condutividade térmica na amostra de solo apresenta valores maiores para as condições de 60% de umidade relativa do ar e temperatura de 15°C, em média o valor da diferença nestas condições é de aproximadamente 0,060 W/mK.

Este comportamento está coerente com o fato de que em solos com menor temperatura o conteúdo de umidade é maior e conseqüentemente é maior a condução de calor.

Na Figura 5.11 é apresentado o gráfico que descreve o comportamento da condutividade térmica da amostra de solo próximo da resistência 2, que está localizada mais abaixo em relação à resistência 1 e também à superfície.

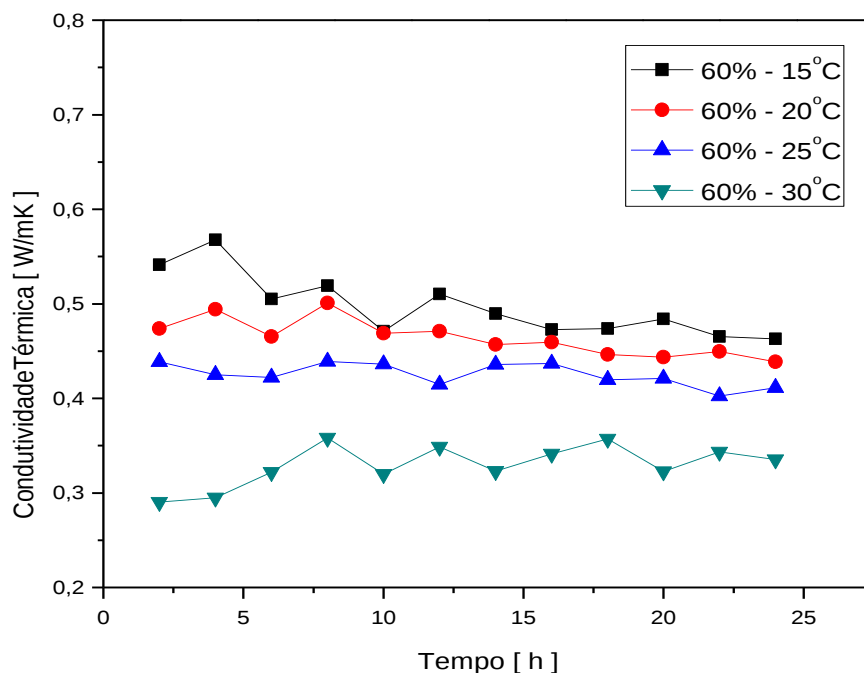


Figura 5.11 – Comparativo entre os valores da condutividade térmica na resistência 2, obtidos com os ensaios 1, 2, 3 e 4.

Ao analisar o gráfico acima, observa-se que apesar da resistência 2 estar localizada mais abaixo em relação à resistência 1, a diferença nos valores da condutividade térmica nas duas condições de ensaio é ainda perceptível, sendo que a diferença ficou em 0,065 W/mK, que é muito próxima ao valor verificado para a

resistência 1. Este fato demonstra que a propagação da temperatura na amostra de solo ocorre com maior velocidade em comparação com a umidade.

A condução de calor segue o mesmo comportamento observado na resistência 1, onde para uma menor temperatura na amostra do solo, resulta em um maior valor da condutividade térmica.

Na figura 5.12 é apresentado o gráfico onde se observa o comportamento da condutividade térmica na amostra de solo nas proximidades da resistência 3, que é a que está situada mais abaixo na amostra. Assim como nos casos anteriores, o valor da umidade relativa no interior da câmara foi mantido constante em 60% e a temperatura variada entre 30° e 15°C.

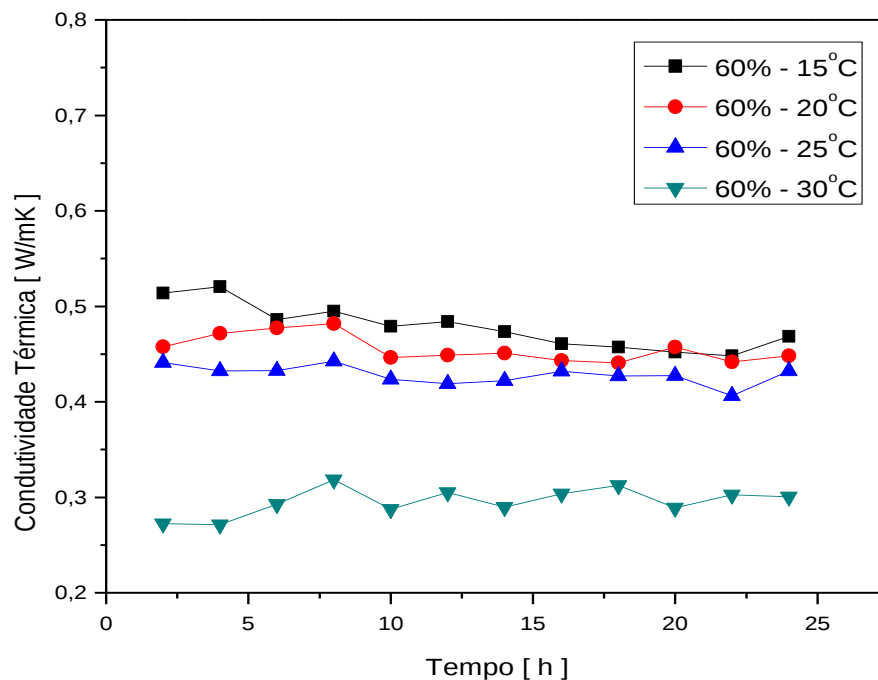


Figura 5.12 – Comparativo entre os valores da condutividade térmica na resistência 3, obtidos com os ensaios 1, 2, 3 e 4.

A Figura 5.12 demonstra que o comportamento da condutividade térmica continua de modo semelhante aos casos anteriores, onde observa-se valores maiores

para a situação onde a temperatura na amostra do solo é menor. Pode-se também observar que, apesar dos cuidados em manter as variações de temperatura o menor possível, é bem provável que possa ter ocorrido a secagem do solo nas vizinhanças das resistências e com isso o valor da condutividade térmica ter sofrido um pequeno decréscimo durante o ciclo de aquecimento e resfriamento.

O efeito da variação da massa da amostra devido a secagem pode ser observada na figura 5.13, que representa o comportamento da condutividade térmica em função da massa da amostra.

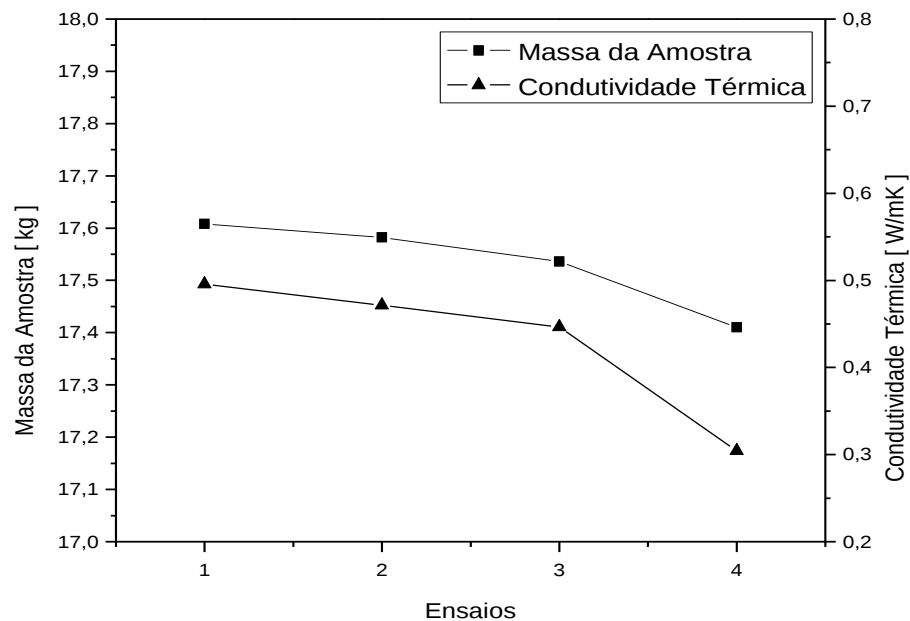


Figura 5.13 – Variação da massa e da condutividade térmica

Devido ao fato de o aparato ter sido manuseado de tal forma a evitar que ocorresse perda de parte da amostra, a variação que ocorre na massa desta amostra pode ser creditada à variação do seu conteúdo de umidade. Observa-se que o valor da condutividade térmica acompanha a variação da massa da amostra, este fato pode ser explicado devido à proporcionalidade que existe entre o comportamento da condutividade térmica com o conteúdo de umidade na amostra.

Nesta seção, duas situações foram simuladas, no primeiro momento manteve-se a temperatura constante com alteração do valor da umidade relativa do ar e, no segundo momento a umidade relativa do ar manteve-se constante e a temperatura que foi alterado. Verificou-se que a estabilização das condições imposta ocorreu com maior rapidez para a condição onde a temperatura foi o parâmetro a ser alterado. Esta dedução foi feita a partir da observação de que na parte mais profunda da amostra, os valores da condutividade térmica apresentaram valores próximo nos ensaios realizados.

5.3 Avaliação da influência do conteúdo de umidade

Na Figura 5.14, é apresentada a comparação entre a condutividade térmica com o conteúdo de umidade da amostra de solo. A análise ocorreu na resistência 1 devido a sua proximidade com a superfície e conseqüentemente ser onde as alterações nas condições de temperatura e conteúdo de umidade ocorrem em menor tempo.

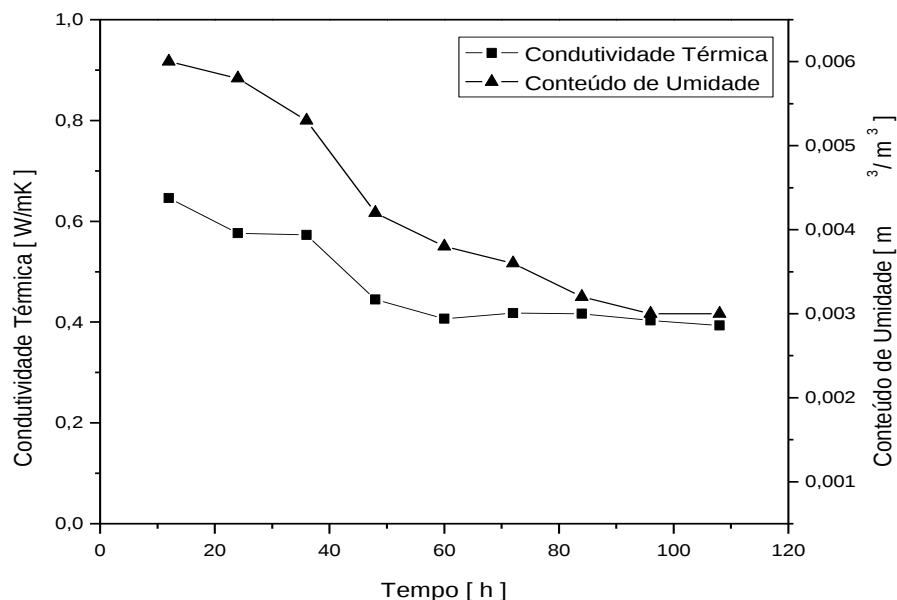


Figura 5.14 – Variação da condutividade térmica e do conteúdo de umidade com o tempo para a resistência R1.

Pela análise do gráfico, observa-se que a variação dos valores da condutividade térmica é diretamente proporcional com o conteúdo de umidade. Este dado demonstra a forte dependência entre estas duas propriedades.

Na tabela 5.2 são apresentados os intervalos de valores encontrados para a condutividade térmica. Foram considerados os valores mínimos e máximos para cada condição de ensaio e no cálculo da condutividade térmica média foram considerados todos os valores das três posições.

Tabela 5.2 – Valores máximo, mínimos e médio da condutividade térmica (W / mK)

	Resistência 1	Resistência 2	Resistência 3	Média
	min	min	min	
	max	max	max	
Ensaio 1	0,25531 0,37474	0,28682 0,41720	0,29575 0,41296	$\lambda = 0,30424$
Ensaio 2	0,43306 0,51041	0,42096 0,45918	0,43234 0,45207	$\lambda = 0,44640$
Ensaio 3	0,49921 0,56162	0,41317 0,50481	0,40734 0,43915	$\lambda = 0,47144$
Ensaio 4	0,55592 0,66086	0,47263 0,56774	0,45738 0,52062	$\lambda = 0,49553$

5.4 Cálculo das incertezas

Substituindo os termos dos coeficientes de sensibilidade determinados e substituindo-os na Equação 4.5, tem-se:

$$\frac{IM_{\lambda}}{\lambda} = \pm \sqrt{\left(\frac{(IM_{\lambda})_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{\lambda})_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{\lambda})_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{\lambda})_{T_1}}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{\lambda})_{T_2}}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{\lambda})_{t_1}}{t_1 \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} + \frac{(IM_{\lambda})_{t_0}}{t_0^2 \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)}\right)^2} \quad (5.11)$$

Para o cálculo do valor da incerteza de medição relacionada a condutividade térmica serão utilizados os valores máximos das variáveis dependentes já citadas. A partir da incerteza de medição máxima, será verificada a qualidade dos resultados obtidos nos experimentos.

Na Tabela 5.4, são apresentados os valores máximos para cada variável.

Tabela 5.4 – Valores máximos das variáveis dependentes

Condutividade térmica	Temperatura	Tensão elétrica	Corrente elétrica	Tempo	Comprim.
0,6608 W/mK	32°C	0,842V	0,413 A	900 s	280 mm

Substituindo os valores disponíveis nas Tabelas 5.3 e 5.4 na Equação 5.11, obtém-se:

$$\frac{IM_{\lambda}}{\lambda} = \pm \sqrt{\left(\frac{0,1}{0,842}\right)^2 + \left(\frac{0,0004}{0,413}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{280}\right)^2 + \left(\frac{1,5}{32}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{900 \ln(900)}\right)^2}$$

$$\frac{IM_{\lambda}}{\lambda} = \pm 0,13$$

Deste modo, em uma condição onde a amostra toda é considerada, o valor da condutividade térmica aparente da amostra é:

$$\lambda = 0,43 \pm 0,13 \text{ W/mK}$$

Este valor encontra-se de acordo com as referências em diversas literaturas, indicando que o experimento apresenta-se de forma consistente.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

A análise final abordará quatro itens: (i) o desempenho do aparato experimental e do sistema de aquisição de dados, (ii) a influência da temperatura e do conteúdo de umidade do solo no valor da condutividade térmica do solo, (iii) a análise da incerteza de medição presente neste experimento e (iv) sugestões para futuros trabalhos.

O experimento apresentou boa consistência na obtenção dos valores e boa repetibilidade, entretanto foi necessário realizar o isolamento entre a resistência e os termopares para que o ruído produzido pela passagem da corrente elétrica não interferisse no sinal coletado pelo sistema de aquisição.

Em relação aos termopares, foram utilizados termopares tipo T (cobre-constantan) calibrados através do Calibrador OMEGA modelo CL 740A, apresentado erros percentuais entre 0,08% a 0,53%, para uma faixa de medição entre 15°C a 50°C.

A temperatura no interior da câmara, que simula a temperatura do ar em contato com a superfície do solo, indica uma forte influência deste nas propriedades térmicas do solo, constatou-se pelos valores obtidos que a variação da temperatura provocou alterações nos valores da condutividade térmica em um curto intervalo de tempo. Para uma variação de temperatura entre 30°C e 15°C, o valor da condutividade térmica variou de 0,30424 W/mK para 0,49553 W/mK respectivamente, para uma umidade relativa do ar do interior da câmara de 60%. Estes representam o valor médio na amostra toda, se for considerada a profundidade de medição, constata-se que na posição mais próxima da superfície, a interferência da temperatura é mais perceptível.

Verificou-se que o conteúdo de umidade presente exerce uma forte influência na capacidade de conduzir calor do solo, para a amostra inserida em um meio onde a umidade relativa é 60%, a condutividade térmica do solo foi em média de 0,48 W/mK, enquanto que para 20%, este valor foi de 0,39 W/mK. Esta diferença é mais perceptível na resistência que se encontra mais próxima da superfície e diminui à medida que a

profundidade aumenta, este comportamento pode explicar a dificuldade da migração da umidade do ar para o interior do solo.

Constatou-se que quanto maior o conteúdo de umidade maior é a condutividade térmica, para um solo com $0,006 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de conteúdo de umidade o valor da condutividade térmica é de aproximadamente $0,65 \text{ W/mK}$, enquanto que para $0,003 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de conteúdo de umidade o valor da condutividade diminui para aproximadamente $0,40 \text{ W/mK}$. Este fato indica a influência do calor latente nesta propriedade e que é resultante do estado da umidade na forma de vapor.

A incerteza de medição de todo o conjunto de aquisição de dados foi de $\pm 0,13$, indicando uma boa confiabilidade deste sistema de medição. Erros no sistema de aquisição de dados também podem ter ocorridos, principalmente nas medições da temperatura, em função da fixação do termopar nas resistências ter sido feita manualmente.

Para trabalhos futuros, as propostas são de utilizar os estudos com problemas inversos juntamente com os resultados obtidos em novas medições no aparato e também de levantar quantitativamente a contribuição do conteúdo de umidade e da temperatura na capacidade de conduzir calor do solo. Também pode-se desenvolver novos trabalhos, com outros tipos de solos, com a finalidade de comparar os resultados obtidos através deste aparato experimental com os resultados obtidos em trabalhos desenvolvidos em outros laboratórios, visto que solo padrões são difícil de serem obtidos e que os métodos de medições apresentam variações que podem resultar em desvios nos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12538. **Desempenho Térmico de Edificações** - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Setembro, 2003.
- ABU-HAMDEH, N.H **Thermal properties of soils as affected by density and water content**. Biosystems Engineering (2003) 86 (1), 97–102.
- AKINYEMI, O. D.; MENDES, N. **Numerical and experimental determination of surface temperature and moisture evolution in a field soil**. J. Geophys. Eng. 3 (2006) 1-11.
- ALVALÁ, R. C. S. *et al.* **Medidas das propriedades térmicas do solo no Pantanal Sul Mato Grosossense durante o período de transição seco-úmido de 2001-2002**. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu PR, 2002.
- ANTCZAK, E. *et al.* **Characterisation of the thermal effusivity of a partially saturated soil by the inverse method in the frequency domain**. Applied Thermal Engineering 23 (2003) 1525–1536.
- BAGGIO, P. *et al.* **Some considerations on modeling heat and mass transfer in porous media**. Transport in Porous Media 28 (1997) 233–251.
- BARROS, N. *et al.* **Calorimetry and soil**. Thermochemica Acta 458 (2007) 11–17.
- BEJAN A., **Heat transfer**, John Wiley & Sons, New York. 1993.
- BRUIN, S.; LUYBEN, K.Ch.A.M. **Drying of food materials: a review of recent developments**. In: Advances in drying. v.1. Washington, D.C.: Hemisphere, p. 155-215, 1980.
- CARPENTIER, O. *et al.* **In situ thermal properties characterization using frequential methods**. Energy and Buildings (2007).
- CLIVATI, A. A. **Método proposto para a determinação da difusividade térmica de meios porosos**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, UFPR, 1991.
- DANTAS, L.B.; ORLANDE, H.R.B.; COTTA, R.M. **An inverse problem of parameter estimation for heat and mass transfer in capillary porous media**. International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 1587–1598.
- De VRIES, D.A. **The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited**, Int. J. Heat Mass Transfer 30 (7) (1987) 1343–1350.

DUARTE, A. P. L. **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica.** Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

FLORA, L. C. D. **Influência da massa específica na difusividade térmica do solo em diferentes umidades.** Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática. UNIJUÍ, 2006.

GRIFOLL, J.; GASTO, J. M.; COHEN, Y. **Non-isothermal soil water transport and evaporation.** *Advances in Water Resources* 28 (2005) 1254-1266.

HAMPTON, D. **Coupled heat and fluid flow in saturated-unsaturated compressible porous media.** Colorado, USA, 1989. 293p. Monografia (Tese de Ph.D.) – Colorado State University, Fort Collins.

HAUPIN, W. E. **Am. Ceram. Soc. Bull.** **39**, 3 (1960) 139.

INCROPERA, F. O. e WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1990.

JACKSON, R.D. e TAYLOR, S.A. **Thermal conductivity and diffusivity**, In: Balck, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, 2nd edition. American Society of Agronomy, Madison, Wis, (1986) 945–956.

JACSON, R.D. *et al.* **Diurnal soil-water evaporation: comparison of measured and calculated soil-water fluxes.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38, (1974) 861- 866.

JURY, W.A., LETEY, J., Jr. **Water vapor movement in soil: Reconciliation of theory and experiment.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43 (1979) 823 – 827.

LEAL, F.C. **Análise numérica de problemas termo-hidráulicos em meios porosos.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio, 2003.

LIU, B.C. *et al.* **Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer.** *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005) 4579–4589.

MENDES, N. **Modelos para previsão da transferência de calor e umidade em elementos porosos de edificações.** Tese de doutorado, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

MENDES, N. *et al.* **Moisture effects in conduction loads.** *Energy and Building* 35 (2003) 631-644.

MITCHELL, J. K. **Conduction phenomena from theory to geotechnical practice**, *Géotechnique*, v 41 n 3, 1991. 299-340.

MORTENSEN, A.P. *et al.* **Multifunctional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport.** *Advances in Water Resources* 29 (2006) 250–267.

MOURA, L.M. **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida.** Dissertação de Mestrado, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

NAIDU, A.D.; SINGH, D.N. **A generalized procedure for determining thermal resistivity of soils.** *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) 43–51.

PARLANGE, M.B. *et al.* **Review of heat and water movement in field soils.** *Soil & Tillage Research* 47 (1998) 5-10.

PEREIRA, G.C.C. **Modelagem de condicionadores de ar residenciais.** Dissertação de Mestrado, Curitiba, Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2003.

PHILIP, J.R. e de VRIES, D.A. **Moisture movement in porous materials under temperature gradients.** *Trans. Am. Geophys. Union* 38 (1957) 222–232.

PORFÍRIO, J. **Avaliação das propriedades de transporte térmico de compósitos de resina epoxídica com carga condutora de calor pelo método do fio quente.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole Ltda, 1990.

REINERT, D. J. e REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo.** Universidade federal de Santa Maria – UFSM, 2006

ROSE, CW. **Water transport in soil with a daily temperature wave. I. Theory and experiment.** *J Soil Res* (1968) 6 31– 44.

SANTOS, W.N. **O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície.** *Cerâmica* 48, Abr/Mai/Jun (2002) 306.

SILANS, A.P. *et al.* **Determinação *in loco* da difusividade térmica num solo da região da Caatinga (PB).** *R. Bras. Ci. Solo*, 30 (2006) 41-48.

SILVA NETO, A. J. e CARVALHO, G. **O Projeto de Experimentos para a Caracterização Térmica de Polímeros com a Solução de Problemas Inversos,** Anais XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, São Paulo.

STOCKER, W.F. e JONES, J.W. **Refrigeração e Ar Condicionado.** Mc Graw Hill do Brasil, 1985.

TAYLOR, J.L. **Fundamentals of Measurement Error**. Neft Instrument Co. Monrovia (1988) 74 – 84.

VAZ, L.F. **Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v.19:2, (1996) 117-136.

WIERENGA, P.J., de WIT, C.T. **Simulation of heat transfer in soils**. Soil Sci Soc Am Proc 34 (1970) 845–848.

ZHANG, H.F. *et al.* **Heat conduction and heat storage characteristics of soils**. Applied Thermal Engineering 27 (2007) 369–373.