

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

**CORRELAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM SUAS
PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS EM UM MEIO
POROSO**

Dissertação a ser apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia, por Luisa Maria Caleiro
Acerbi, para a obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Mecânica, tendo como Banca
Examinadora:

Prof. Ricardo Fortes de Miranda, Dr.
(Orientador - UFU)

Prof. Gilmar Guimarães, Dr.
(Co-orientador - UFU)

DIRBI/UFU

536.2 A173c /TES/FU
06028/95



1000022699

Prof. Aristeu Silveira Neto, Doc. Ing.
(UFU)

Prof. Renato Machado Cotta, Ph. D.
(COPPE/UFRJ)

Uberlândia, 19 de outubro de 1995.

Aos meus pais, marido e irmãos.

520

AGRADECIMENTOS

82020

Ao Professor Orientador Ricardo Fortes de Miranda pelo incentivo, amizade e força na realização deste trabalho.

Ao Professor Gilmar Guimarães pela instrução e apoio.

Ao meu irmão, Joaquim Mário, pela compreensão, ajuda e incentivo na execução do trabalho.

Ao meu esposo, Aduino Manfrin, pela compreensão da ausência e incentivo.

Aos colegas de mestrado e Iniciação Científica, principalmente ao Sandro "Carioca", Mechelangelo e Leonardo, pela companhia e apoio nas horas difíceis da realização do trabalho.

Ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - CNPq, através do projeto de nº 521212/93NV e à CAPes.

CORRELAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS EM UM MEIO POROSO

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
CAP. 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivo do trabalho	1
1.2 - Revisão bibliográfica	4
1.2.1 - Transmissão de calor e massa em meios porosos	4
1.2.2 - Determinação da condutividade térmica e difusividade térmica	9
CAP. 2 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO	14
2.1 - Teoria geral do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos	15

2.2 - Condutividade térmica efetiva e tensor de dispersão	22
2.3 - Análise da água evaporada na fase gasosa	25
2.4 - Equação da condução de calor no meio poroso	30
2.5 - Solução analítica do problema proposto	32
CAP. 3 - MODELAGEM EXPERIMENTAL	37
3.1 - Conceitos e fundamentos	37
3.2 - Descrição da bancada	47
3.5 - Desenvolvimento Experimental	50
CAP. 4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1 - Apresentação dos resultados	53
4.2 - Discussão da influência da saturação no meio poroso	65
4.3 - Correlação da saturação com a condutividade térmica	71
CAP. 5 - ANÁLISE DE INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DE “k” E “α”	75
5.1 - Introdução à análise de incerteza	75
5.2 - Análise de incerteza das medidas do fluxo de calor	79
5.3 - Análise de incerteza das medidas de temperaturas	81
5.4 - Análise de incerteza da medida da espessura da amostra porosa	82
5.5 - Comparação dos parâmetros	85

CAP. 6 - CONCLUSÃO

86

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

89

ACERBI, L.M.C.; “Correlação do Teor de Umidade com suas propriedades termofísicas em um meio poroso”, Uberlândia, 1995.

RESUMO

O conhecimento da distribuição de umidade em um meio é de grande importância em vários processos industriais. Este estudo propõe determinar em um meio poroso uma correlação entre propriedades termofísicas e o teor de umidade. Neste trabalho construiu-se amostras porosas com diferentes porosidades que foram submetidas a uma análise térmica. A caracterização térmica destas amostras é obtida com o levantamento do perfil de temperatura através de termopares superficiais e internos e do fluxo de calor que atravessa o meio. As propriedades termofísicas são obtidas através do método de estimação de parâmetros no domínio do tempo. A correlação proposta permite uma visão qualitativa e quantitativa da influência da saturação e porosidade nas propriedades termofísicas.

PALAVRAS CHAVES: Propriedades termofísicas - teor de umidade - estrutura porosa saturada - estimação de parâmetros.

ABSTRACT

The knowledge of humidity in a medium is very important in many industrial process. The purpose of this study is to determine a correlation between moisture and thermophysical properties. In this work were constructed porous samples with diferent porosities that was submitted to a thermal analysis. Thermal characterization of this samples are obtained with the survey of the temperture profile through superficial and internal thermocouples and heat flux that cross the medium. The thermophysical properties are obtained by parameter estimation technique in the time domain. The proposed correlation allows both a vision quantitative and qualitativity of the saturation influence and porosity in the thermophysical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 - Aparato Experimental	12
2.1 - Fluxo de calor imposto na amostra porosa	31
3.1.a) - Montagem Experimental	39
3.1.b) - Amostra porosa submetida às condições de contorno	39
3.2 - Aparato Experimental	41
3.3 - Meio poroso de diâmetro de 05 - 09 mm, $\epsilon = 0,20$	42
3.4 - Meio poroso de diâmetro de 08 - 12 mm, $\epsilon = 0,24$	42
3.5 - Meio poroso de diâmetro de 10 - 14 mm, $\epsilon = 0,36$	43
3.6 - Fôrma de aço padrão usada para a formação do meio poroso	44
3.7 - Fôrma de aço usada para os experimentos iniciais do cálculo da temperatura e tempo de sinterização	45
3.8 - Amostra porosa padrão de $\phi = 08 - 12$ mm, $\epsilon = 0,24$	46

3.9 - Correntes de fluxo de calor dentro da amostra com dimensão menor placa resistiva de calor	46
3.10 - Novo ângulo da amostra porosa de $\phi = 10 - 14$ mm	47
4.1 - Fluxo de calor na superfície frontal da amostra porosa (B)	56
4.2 - Fluxo de calor na superfície oposta à fonte de calor da amostra porosa (B)	56
4.3 - Perfis de temperaturas teóricas e experimentais na superfície superior, inferior e interna da amostra porosa (B)	57
4.4 - Coeficientes de sensibilidade para cada um dos parâmetros, k e α , em cada posição dos termopares da amostra porosa (B)	58
4.5 - Perfis de temperaturas teóricas e experimentais. (Amostra porosa (A))	60
4.6 - Coeficientes de sensibilidade (Amostra porosa (A))	60
4.7 - Perfis de temperaturas teóricas e experimentais. (Amostra porosa (C))	61
4.8 - Coeficientes de sensibilidade (Amostra porosa (C))	62
4.9 - Amostra porosa seca com imposição do fluxo de calor na parte inferior	63
4.10 - Apresentação dos perfis de temperaturas para a amostra úmida (B) com 10% de saturação	66

4.11 - Apresentação dos perfis de temperaturas para a amostra úmida (B) com 20% de saturação	67
4.12 - Apresentação dos perfis de temperaturas para a amostra úmida (B) com 30% de saturação	67
4.13 - Apresentação dos perfis de temperaturas para a amostra porosa úmida (B) com 2,5% de saturação	68
4.14 - Apresentação dos perfis de temperaturas para a amostra porosa úmida (B) com 10% de saturação	69
4.15 - Apresentação dos perfis de temperaturas para a amostra porosa úmida (C) com 10% de saturação	70
4.16 - Condutividades térmicas em função da saturação para as amostras porosas (A), (B) e (C), com f.c. posicionada na superfície inferior e superior à amostra e sua correlação genérica. T média = 28 °C	71
4.17 - Condutividade térmica em função da porosidade do meio	74

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
4.1 - Apresentação dos valores dos parâmetros estimados máximo, mínimo e médio para os três tipos de amostras porosas	55
4.2 - Comparação dos valores das condutividades térmicas experimentais e empíricas segundo Krupiczka de cada uma das amostras porosas	64
5.1 - Amostragem das espessuras medidas da amostra porosa (B) de $L = 13,85 \times 10^{-03}$ m	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade
A_z = superfície representativa do volume de controle	m^2
\bar{b}_x = termo auxiliar que descreve a temperatura de flutuação, T' , em função da temperatura média, $\langle T \rangle$	k
D = tensor da condutividade térmica efetiva local	
f = coeficiente de difusão binária ar - vapor	
G (x, t, x', τ) = função de Green	
Δh = variação de entalpia armazenada sob a forma latente dentro da fase gasosa	kcal/kg
i_{lg} = calor latente dos gases condensáveis	kcal/kg.k
k = condutividade térmica efetiva do meio poroso	w/m.k
k_x = condutividade térmica de cada uma das fases	w/m.k
\bar{k}_e = condutividade térmica efetiva	w/m.k
k_s = condutividade térmica do sólido	w/m.k
k_f = condutividade térmica do fluido	w/m.k
L = espessura do meio poroso	m

$\langle \dot{m} \rangle$ = quantidade de água que se evapora por unidade de volume e tempo do meio poroso	kg/m ³ .s
m_v = massa de vapor transportado	kg
M_v = massa molecular do vapor	mol
\vec{n}_z = vetor normal à superfície do volume de controle	
P = pressão total do meio poroso	atm
P_a = pressão do ar	atm
P_v = pressão de vapor	atm
P_{v_s} = pressão de vapor saturado	atm
\dot{q}_x = termo fonte de cada uma das fases	
q_1 = fluxo de calor que fica na superfície da fonte de calor	w/m ²
q_2 = fluxo de calor que fica na superfície oposta à fonte de calor	w/m ²
R = constante universal dos gases perfeitos	kgf.m/kg.k
S = saturação do meio poroso = V_l/V_c	
t = tempo	s
T_0 = temperatura inicial do meio poroso	k
T_x = temperatura de cada uma das fases	k
$\langle T \rangle_x$ = temperatura média de cada uma das fases	k
T' = temperatura de flutuação de cada uma das fases, que é a componente do desvio espacial da temperatura	k
T_{ij} = temperaturas teóricas, calculadas através	

do modelo teórico	k
\vec{u}_x = velocidade de cada uma das fases	m/s
V = volume elementar representativo do volume de controle	m³
V'_x = componente de flutuação do volume elementar representativo para cada uma das fases	m³
V_s = volume elementar representativo do sólido	m³
x = posição do termopar locado dentro da amostra porosa	
$X_{i\alpha}$ = coeficiente de sensibilidade em relação a difusividade térmica	
X_{ik} = coeficiente de sensibilidade em relação a condutividade térmica	
\vec{w} = vetor interfacial do meio poroso	
$W_v = \rho_v/\rho$ = fração mássica do vapor no meio poroso	
Y_{ij} = Temperaturas experimentais	

Símbolos gregos:

α = difusividade térmica do meio poroso	m²/s
β_m = auto - valores	
\mathcal{D} = coeficiente de difusão binária ar - vapor	

ε = porosidade do meio poroso = V_v/V_c	
ϕ_1 = fluxo de calor imposto na superfície frontal do meio poroso	w/m^2
ϕ_2 = fluxo de calor resultante na superfície oposta do meio poroso	w/m^2
λ_{dif} = condutividade térmica "difusiva"	m^2/s
ρ = densidade total do meio poroso	kg/m^3
ρ_v = densidade do vapor	kg/m^3
$(\rho c_p)_x$ = calor específico do meio poroso de cada uma das fases	$kcal/m^3.k$

Subscritos:

a = fase do ar;

f = fase fluida;

fs = interface fluida - sólida;

g = fase gasosa;

gf = interface gasosa - fluida;

gs = interface gasosa - sólida;

i = número de sensores;

j = instantes discretos de medição;

l = fase líquida;

lg = interface líquida - gasosa;

ls = interface líquida - sólida;

m = contador dos auto-valores;

s = fase sólida;

v = fase vapor;

x = indica cada uma das fases em questão;

z = indica cada uma das interfaces em questão.

Capítulo 1

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Objetivo do trabalho

O estudo e o conhecimento da distribuição de umidade em várias substâncias já é uma rotina em processos industriais e tecnológicos. A infiltração da chuva no solo e nas paredes das construções, bem como a secagem de grãos, são alguns dos exemplos encontrados na natureza e estão associados ao movimento de fluidos nos meios porosos.

A presença de umidade nas edificações contribui para a transferência de calor que interfere no conforto térmico e ainda produz dilatações térmicas nos materiais porosos causando as fissuras e formação de microorganismos que interferem na durabilidade dos materiais. O maior ou menor efeito desta dilatação é associado ao teor de umidade. A caracterização térmica é baseada no levantamento do perfil de temperatura e fluxo de calor que atravessa o meio poroso para a determinação da condutividade térmica, da difusividade térmica e do

calor específico que estão correlacionados com o teor de umidade. Esta caracterização pode contribuir para contornar os problemas de infiltrações nas construções civis e melhorar as futuras estruturas porosas.

O estudo da transmissão de umidade e de calor em meios porosos também está diretamente ligado ao conforto térmico, pois as condições térmicas nos ambientes de trabalho e lazer são afetadas com maior ou menor intensidade pela umidade e temperatura e como as paredes são construídas de materiais porosos que permitem a passagem de umidade e calor, estas influenciam diretamente o bem estar do homem.

Os processos de transferência de calor e umidade em um meio poroso varia com a estrutura da matriz sólida e com a saturação, que é um grande fator de influência no cálculo das propriedades termofísicas.

O estudo dos gradientes de umidade. iniciou-se com o trabalho de Darcy no século dezenove, cobrindo uma larga faixa de diferentes campos e aplicações como hidrologia, reservas de petróleo, operações geotérmicas, reatores químicos com leito compactado, torres de resfriamentos e separações térmicas. Muitos estudos analíticos partem primeiramente para a modelagem geométrica do material poroso na qual a estrutura porosa forma uma matriz geralmente assumida como esférica, quadrada, cônica e outras. Esta modelagem é feita através de representações matemáticas simplificadas para moldar da melhor maneira os transportes de calor e massa, permitindo uma melhor compreensão dos

fenômenos físicos do problema, e tornando possível a obtenção das propriedades termofísicas.

Neste trabalho utiliza-se a técnica de estimação de parâmetros para a obtenção da condutividade térmica, k , e da difusividade térmica, α , em um meio poroso composto de esferas de vidro e com o conhecimento destas propriedades obtém-se a influência da umidade nestas propriedades e correlaciona-se o grau de saturação com sua respectiva condutividade térmica.

O trabalho pode ser dividido em três etapas:

- A primeira etapa foi dedicada à construção da amostra porosa, ao cálculo de sua porosidade, à montagem do aparato experimental e ao conhecimento do processo computacional para a estimação da condutividade e da difusividade térmicas. Esta etapa consistiu também em levantar os valores da condutividade e da difusividade térmicas das amostras porosas secas para se ter melhor controle térmico sobre elas;
- A segunda etapa foi dedicada ao levantamento dos valores da condutividade e da difusividade térmicas com seus respectivos graus de umidade, sendo a fonte de calor posicionada na superfície superior da amostra para evitar o efeito de convecção se existir;
- A terceira e última etapa consistiu em obter dados experimentais da condutividade e da difusividade térmicas com seus respectivos graus de saturação, com a fonte de calor posicionada na superfície inferior da amostra porosa para a observação do efeito convectivo sobre os valores das propriedades termofísicas.

1.2 - Revisão Bibliográfica

O assunto proposto é muito extenso e possui vários trabalhos publicados. Na revisão bibliográfica que se segue comenta-se na primeira parte deste tópico as publicações de interesse sobre estudos feitos em fenômenos de transferência de calor e massa em meios porosos. A segunda parte é dedicada a alguns estudos sobre o levantamento das propriedades termofísicas, condutividade térmica e difusividade térmica, e como é feito este levantamento neste trabalho.

1.2.1 - Transmissão de calor e massa em meios porosos

Um dos primeiros a correlacionar os processos de transferência de calor e massa em meios porosos foi Luikov (1968) que equacionou o problema interrelacionando os processos de transporte de calor e massa, utilizando a termodinâmica irreversível, obtendo um sistema de equações diferenciais parciais de segunda ordem, não lineares, acopladas nas duas variáveis dependentes, temperatura e umidade do meio poroso. De acordo com Souza (1993), os fenômenos de transferência

que ocorrem no seio do material poroso são bastante influenciados pela geometria porosa. A estrutura dos materiais contém uma fase vazia conexa no interior de uma fase sólida, onde ocorrem os processos de transferência de calor e massa.

A análise de transferência de calor e massa é usualmente baseada nas equações de transporte que descrevem o campo de velocidade e de temperatura. Esta análise é baseada na solução das equações de conservação de massa, momento e energia associadas, sujeitas às condições de contorno pertinentes. Quando ocorre um escoamento através de uma estrutura complexa como um meio poroso, estas equações de transporte são válidas dentro dos poros, mas como os poros possuem formas e tamanhos bastante irregulares e desiguais interferem na tentativa de modelar matematicamente o fenômeno de transferência.

O processo de transferência de calor e massa através dos materiais porosos é complexo mesmo quando o material está seco, pois envolve condução através da fase sólida, condução e convecção através do estado gasoso dentro dos poros ou vazios e radiação através da superfície sólida. Quando o material poroso é submetido a umidade substituindo parte da fase gasosa dentro dos poros, a taxa de fluxo de calor aumenta desde que a condutividade térmica do líquido seja muito maior do que a do gás. Além disto o processo de evaporação, migração de vapor e condensação sucessivos constitui também em transporte de calor.

Woodside e Messmer (1961) consideram que qualquer material poroso bifásico é constituído de um componente sólido

(subscrito s) e um fluido saturando o espaço do poro (subscrito f) e que a condutividade térmica efetiva k de cada material do meio bifásico depende dos seguintes parâmetros:

- a condutividade térmica das duas fases, k_s e k_f ;
- as concentrações de volume das duas fases, $(1-\varepsilon)$ e ε , onde ε é a porosidade;
- a distribuição das duas fases no material poroso;
- da partícula ou área dos poros;
- da radiação para os casos de temperaturas altas onde a transferência de calor por radiação em um fluido gasoso não é desprezada;
- da convecção quando as áreas dos poros são grande o bastante para que a transferência de calor por convecção ocorra;
- do processo de mudança de fase que transporta energia térmica.

Em meios úmidos o calor produz a formação de gradiente de temperatura que causa um movimento de umidade, esta tende a se redistribuir dando um aumento ao transporte de calor latente e sensível, na qual muitas vezes influencia a distribuição de temperatura. De acordo com De Vries (1954), um tratamento quantitativo do transporte combinado de calor e umidade em meios porosos leva às expressões simplificadas para diminuir a complexidade deste problema.† Nestas simplificações, o transporte de calor sensível devido à gravidade ou à queda de pressão é desprezado! Dentro dos poros ocorre a difusão de vapor devida ao gradiente de temperatura, que dá acréscimo ao gradiente de pressão, o qual é desprezível se o meio em questão não sofrer mudança

de fase. Em um estudo mais adiante, Philip e DeVries (1957), colocam que a transferência de calor e massa ocorrem simultaneamente e interdependentemente e que este meio poroso pode passar por um processo de evaporação e condensação sucessivas, modificando o processo de transmissão de calor.

Segundo De Vries (1987), a teoria de transferência de calor e umidade passa por limitações e hipóteses que são propostas para diminuir a complexidade das soluções das equações sendo as principais limitações:

- a teoria não se aplica quando a matriz não é rígida;
- o meio poroso precisa ser homogêneo e isotrópico no sentido macroscópico;
- a pressão total é uniforme e constante;
- equilíbrio termodinâmico local prevalece em todo o meio poroso;
- a temperatura dependente da densidade do líquido, calor específico, entalpia e o comprimento da amostra é desprezível;
- histereses em relação ao potencial de umidade no meio poroso não é levada em conta;
- fenômenos de superfícies na interface entre a matriz e o líquido não são levados em conta.

A análise quantitativa do fenômeno de transporte de calor em solos tem sido tratado como um problema acoplado de transferência de calor e massa por Sasaki et al (1985) onde é importante conhecer as propriedades termofísicas do meio que se trabalha, cujo controle de

temperatura incrementa a produção vegetal. Salienta-se que o calor nos solos não é somente transmitido por condução através do sólido, líquido e gás, mas também por migração da água e difusão de vapor baseado no gradiente de temperatura e pela transição de fase. Portanto, as propriedades termofísicas de solos precisam ser claras. Entretanto, é difícil conhecer esses valores que dependem da temperatura, umidade, fração de vazios e espécie de solo, sendo satisfatório considerar efetivo resolver a equação de condução de calor usando as propriedades termofísicas aparentes incluindo a contribuição de transferência de massa.

Silveira Neto (1985), em sua dissertação de mestrado, escreveu que a temperatura interna e a umidade relativa são, basicamente, funções dos ganhos e perdas de energia do ambiente interno e que usualmente esses cálculos de carga térmica são feitos pelo processo de condução de calor pura pelas paredes, esperando que ocorra processo de transmissão de calor e o processo de transporte de massa. No estudo resolveu-se o problema de transferência de calor e massa numa placa porosa infinita não saturada, propondo um sistema de equações linearizadas e fazendo a hipótese de que as propriedades termofísicas são conhecidas e independentes da temperatura e do conteúdo de umidade.

De acordo com Kaviany (1991), a condução de calor através de uma matriz totalmente saturada (isto é, um fluido de fase única ocupando os poros), bem como condução de calor através de algum meio heterogêneo, depende da estrutura da matriz e da condutividade térmica

de cada fase. Uma das maiores dificuldades no aspecto de analisar a condução de calor através de um meio poroso é a modelagem estrutural, por ser tridimensional e possuir estruturas complicadas que variam grandemente entre os diferentes meios porosos. A condutividade térmica da fase sólida é geralmente bem maior do que a do fluido, a maneira na qual o sólido é interconectado influencia significativamente na condução de calor juntamente com a resistência de contato entre as partículas não consolidadas. [

1.2.2 - Determinação da condutividade térmica e difusividade térmica

O estudo das técnicas experimentais para a determinação das propriedades termofísicas, condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico, de diversos materiais tem interessado muitos pesquisadores devido a sua larga aplicação em processos industriais e tecnológicos. Neste trabalho apresenta-se um método para a obtenção destas propriedades através da técnica de estimação de parâmetros no domínio do tempo, apresentada por Guimarães (1993).

Segundo Woodside e Messmer (1961) o conhecimento das propriedades termofísicas de cada material poroso é importante em muitos campos, como por exemplo, cálculos da dissipação de calor frente à explosão nuclear subterrânea e a razão da perda de calor da Terra devido ao gradiente geotérmico que dependem diretamente do valor da condutividade térmica dos materiais envolvidos. O modelo das colunas

compactadas, isolamento térmico e materiais refratários também dependem das características da transferência de calor do meio poroso utilizado.

Portanto é importante o desenvolvimento de técnicas que possibilitem a caracterização térmica do material poroso cuja característica varia com a estrutura porosa e com o grau de umidade.

A investigação de propriedades termofísicas tendo como objetivo o conforto térmico ou projetos industriais, é um tópico importante para descrever o processo de transferência de calor. Em geral, nos modelos experimentais envolvidos para a obtenção simultânea de k e α , é necessário o conhecimento do fluxo de calor e dependem da simulação das condições térmicas assumidas numa bancada experimental.

Os métodos experimentais usados para determinar condutividades térmicas de materiais podem ser classificados dentro de duas categorias: método em regime permanente e o método em regime transiente. O método em regime permanente requer um longo período até se obter um estado estacionário das temperaturas em relação ao tempo, já o método transiente necessita de pouco tempo de realização do experimento. Os métodos de regime transiente são mais utilizados por serem vantajosos em relação ao tempo e tornam desprezíveis as perdas de calor nas bordas e faces da superfície, pois o tempo é pequeno para que isto ocorra.

Segundo Tinker (1973) o conhecimento da condutividade térmica de materiais multifásicos, como o cimento, é de grande

importância e os sistemas de medidas com qualquer grau de exatidão são dispendiosos e necessitam de muito tempo, e se este material contém umidade, aumenta a transferência de calor e dificulta ainda mais o processo de medida! Portanto, parte-se para a modelagem numérica para obter-se a condutividade térmica e, particularmente, o efeito da umidade pode ser analisado e solucionado! Esta modelagem numérica consiste em representar cada componente de cada fase como resistências separadas em forma de placas rearranjadas em séries ou paralelas à direção do fluxo de calor. Os modelos em série possuem condutividades bem menores do que os em paralelos. Estas aproximações simples são particularmente usadas para determinação de um valor mínimo e máximo da condutividade térmica.

Em estudos feitos por Kingery e Francl (1954) em um material poroso como a cerâmica, foi apresentado o efeito da isometria em poros esféricos e anisometria em poros cilíndricos na condutividade térmica de alumina, grafite e níquel, onde se observou que a orientação dos poros afeta profundamente a condutividade térmica para uma dada porosidade! Quando a temperatura está abaixo de 500°C a condutividade térmica das amostras porosas estudadas em qualquer direção é igual à condutividade do sólido vezes a fração do sólido na seção de cruzamento e, para temperaturas mais altas a condutividade térmica é influenciada pela área do poro e a emissividade térmica.

Para se obter a caracterização térmica do meio poroso neste estudo, foi utilizada uma bancada experimental, proposta por Guimarães

(1993), onde é possível conhecer o perfil de temperatura e o fluxo de calor imposto na amostra porosa como mostra a Fig.(1.1).

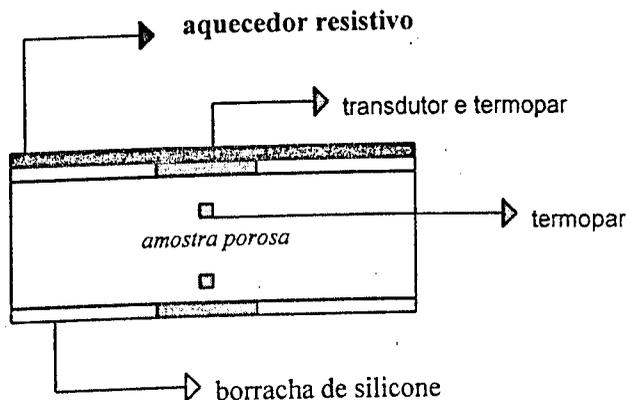


Figura 1.1: Aparato experimental.

Para se determinar as propriedades termofísicas se faz necessário obter um modelo matemático, cuja função é determinar e identificar um campo térmico no meio poroso. Esta equação é utilizada como função de recorrência, onde as propriedades térmicas são obtidas através da comparação dos dados experimentais com os dados teóricos.

Para a obtenção das duas propriedades térmicas de interesse, condutividade térmica e difusividade térmica, foi aplicado o método de estimação de parâmetros segundo Beck e Arnold (1977), onde a estimação de parâmetros é um procedimento iterativo que busca determinar os parâmetros envolvidos na modelagem de algum fenômeno físico. A técnica de estimação de parâmetros e o modelo térmico baseiam-se nas condições de contorno do fluxo de calor imposto na superfície frontal com evolução transiente em ambas as superfícies. O procedimento

básico usado na determinação de propriedades como condutividade térmica e difusividade térmica se dá, usualmente, a partir da concepção de um modelo teórico, obtido da equação da energia. Uma vez estabelecido e identificado um campo térmico na amostra, obtém-se as propriedades a partir da comparação com os dados experimentais e teóricos previstos no modelo. Para o estabelecimento do campo térmico torna-se necessária à aplicação de uma fonte de calor que pode ser variável ou não e, devem ser medidos os fluxos de calor e campos de temperatura. Estas condições só podem ser aplicadas usando-se transdutores de fluxo de calor, que no caso são de rápida resposta e alta sensibilidade. A geração do fluxo de calor é por efeito Joule, através de uma folha de resistência e os fluxos de entrada e saída são medidos por transdutores de fluxo de calor presentes na superfície frontal e oposta. Obtém-se a condutividade térmica e a difusividade térmica minimizando a diferença entre as temperaturas medidas e calculadas nas superfícies e/ou no interior da amostra. A minimização é feita em relação aos parâmetros estimados e a descrição deste método é apresentada no Capítulo 3 onde se descreve a modelagem experimental.

Quando histórias de temperaturas para uma superfície são conhecidas como função do tempo, então a distribuição de temperatura pode ser encontrada, sendo um problema termicamente conhecido.

Capítulo 2

2 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO

Sabe-se que os processos de transporte de calor e massa são interdependentes e a umidade interfere na transmissão de calor, fazendo surgir gradiente de umidade onde pode ocorrer evaporação ou condensação devido ao campo de temperatura. Sabe-se também que umidade dentro de um meio poroso deve ser tanto caracterizada pelas propriedades do fluido, como pelas características geométricas do meio, tais como porosidade e permeabilidade. A partir de um modelo de transferência de calor e de massa acoplado, são definidas diferentes condutividades térmicas que aparecem dentro do modelo físico.

A transferência de calor e massa acoplada necessita da elaboração de um modelo matemático em função dos parâmetros acessíveis ao experimento, começando com o equacionamento que melhor representa este modelo físico baseado nas equações dos princípios da conservação de energia e massa.

Em meios onde ocorre somente condução de calor, os valores da condutividade térmica se limitam à fração volumétrica

das fases presentes e quando se conhece a morfologia do meio, melhor se estima a condutividade térmica.

Um meio poroso úmido é constituído de uma fase sólida (s), supostamente indeformável, de uma fase líquida (l) e de uma fase gasosa (g) composta de ar (a) e de vapor de água (v). A análise da transferência de calor em meios porosos úmidos é complexa devido ao transporte de massa e dos efeitos de evaporação e condensação no interior dos poros, onde se evapora pelo lado quente e quando este vapor chega ao lado frio se condensa. Pode-se desenvolver um modelo matemático para este caso, através das equações de conservação para cada fase.

2.1 - Teoria geral do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos

A equação da energia pode ser escrita como:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \dot{q} + \beta T \frac{dP}{dt} + \mu \Phi \quad (2.1)$$

No presente estudo, pode-se considerar que o fluido é incompressível e não existe dissipação viscosa. Então, a equação da energia se reduz a:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \dot{q} \quad (2.2)$$

A equação da energia para as três fases que compõe o meio poroso do presente trabalho é baseada na equação (2.2) que pode ser escrita como:

Fase sólida:

$$(\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s + \dot{q}_s \quad (2.3)$$

Fase líquida:

$$(\rho c_p)_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial t} + \bar{u}_l \cdot \nabla T_l \right) = k_l \nabla^2 T_l + \dot{q}_l \quad (2.4)$$

Fase gasosa:

a) Para o vapor:

$$(\rho c_p)_v \left(\frac{\partial T_v}{\partial t} + \bar{u}_v \cdot \nabla T_v \right) = k_v \nabla^2 T_v + \dot{q}_v \quad (2.5)$$

b) Para o ar:

$$(\rho c_p)_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + \bar{u}_a \cdot \nabla T_a \right) = k_a \nabla^2 T_a + \dot{q}_a \quad (2.6)$$

Onde:

\dot{q}_x = termo fonte, onde x corresponde a cada uma das fases, sólida (s), líquida (l), vapor (v) e ar (a).

\bar{u}_x = velocidade das fases, onde x corresponde as fases, líquida (l), vapor (v) e ar (a).

$(\rho c_p)_x$ = calor específico onde x corresponde a cada uma das fases.

A temperatura da região de cada fase, T_x , aplicando a média volumétrica local sob um volume elementar, V , pode ser decomposta na seguinte forma:

$$T_x = \langle T \rangle^x + T_x' \quad (2.7)$$

$$\mathbf{v} = V_s + V_x' \quad (2.8)$$

Onde:

T_x = Temperatura de cada uma das fases.

$\langle T \rangle^x$ = Temperatura média local de cada uma das fases.

T_x = Temperatura de flutuação de cada uma das fases, que é a componente do desvio espacial da temperatura.

V = Volume elementar representativo do volume de controle.

x = Componente de flutuação do Volume elementar representativo, onde x corresponde a cada fase fluida.

s = Volume elementar representativo do sólido.

Considerando que os calores específicos e as condutividades térmicas são constantes sobre todo o volume elementar, V , tem-se então:

Fase sólida:

$$(1-\varepsilon)(\rho c_p)_s \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial t} = k_s \nabla \cdot \left[\nabla (1-\varepsilon) \langle T \rangle^s + \frac{1}{V} \int_{A_{sl}} T_s \bar{n}_{sl} dA + \frac{1}{V} \int_{A_{sg}} T_s \bar{n}_{sg} dA \right] + \frac{k_s}{V} \left(\int_{A_{sl}} \nabla T_s \bar{n}_{sl} dA + \int_{A_{sg}} \nabla T_s \bar{n}_{sg} dA \right) + \langle \dot{q}_s \rangle \quad (2.9)$$

Fase líquida:

$$\begin{aligned}
& \varepsilon S (\rho c_p)_l \frac{\partial \langle T \rangle^l}{\partial t} + (\rho c_p)_l \langle \bar{u}_l \rangle \nabla \langle T \rangle^l + (\rho c_p)_l \nabla \cdot \langle u_l' T_l' \rangle \\
& + \frac{(\rho c_p)_l}{V} \int_{A_{lg}} T_l' (\bar{u}_l - \bar{w}) \bar{n}_{lg} dA = k_l \nabla \cdot \left[\nabla \varepsilon S \langle T \rangle^l + \frac{1}{V} \int T_l \bar{n}_{ls} dA + \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} T_l \bar{n}_{lg} dA \right] + \\
& + \frac{k_l}{V} \left(\int_{A_{ls}} \nabla T_l \bar{n}_{ls} dA + \int_{A_{lg}} \nabla T_l \bar{n}_{lg} dA \right) + \langle \dot{q}_l \rangle \tag{2.10}
\end{aligned}$$

Fase gasosa:

$$\begin{aligned}
& \varepsilon (1-S) (\rho c_p)_g \frac{\partial \langle T \rangle^g}{\partial t} + (\rho c_p)_g \langle \rho_g \bar{u}_g \rangle \nabla \langle T \rangle^g + \nabla \cdot (c_p)_g \langle \rho_g u_g' T_g' \rangle + \\
& + \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} (\rho c_p)_g T_g' (\bar{u}_g - \bar{w}) \bar{n}_{gl} dA + \frac{\partial (c_p)_g}{\partial t} \langle \rho_g' T_g' \rangle = \\
& k_g \nabla \cdot \left[\nabla \varepsilon (1-S) \langle T \rangle^g + \frac{1}{V} \int_{A_{gs}} T_g \bar{n}_{gs} dA + \frac{1}{V} \int_{A_{gl}} T_g \bar{n}_{gl} dA \right] + \\
& + \frac{k_g}{V} \left(\int_{A_{gs}} \nabla T_g \bar{n}_{gs} dA + \int_{A_{gl}} \nabla T_g \bar{n}_{gl} dA \right) + \langle \dot{q}_g \rangle \tag{2.11}
\end{aligned}$$

Onde:

ϵ = porosidade do meio poroso.

S = saturação do meio poroso.

\vec{n}_z = vetor normal à superfície do volume de controle, onde o subscrito z corresponde as interfaces entre as fases, sólida - gás, (sg), líquida - gás, (lg), sólida - líquida, (sl).

A_z = superfície representativa do volume de controle, onde z corresponde as interfaces entre as fases.

k_x = condutividade térmica de cada uma das fases, onde x corresponde a cada uma das fases.

$\langle T \rangle$ = temperatura média local.

Considerando que no local as fases estejam em equilíbrio termodinâmico, pode-se então escrever:

$$\langle T_g \rangle^g = \langle T_l \rangle^l = \langle T_s \rangle^s = \langle T \rangle \quad (2.12)$$

Impondo as condições de contorno na superfície interfacial, A_{fs} , onde o subscrito f é o fluido em questão, líquido, ar ou vapor de água, vem:

$$T_f = T_s \quad \text{em } A_{fs} \quad (2.13)$$

$$\vec{n}_{fs} \cdot \vec{k}_f \cdot \nabla T_f = \vec{n}_{fs} \cdot \vec{k}_s \nabla T_s \quad \text{em } A_{fs} \quad (2.14)$$

$$T'_s = T'_f \quad \text{em } A_{fs} \quad (2.15)$$

$$\vec{n}_{sf} = - \vec{n}_{fs} \quad (2.16)$$

Considerando que exista equilíbrio termodinâmico local, pode-se agrupar as equações, obtendo:

$$\begin{aligned} & \left[(1-\varepsilon) (\rho c_p)_s + \varepsilon S (\rho c_p)_l + \varepsilon (1-S) (\rho c_p)_g \right] \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} \\ & + \left[(\rho c_p)_l \langle \vec{u} \rangle_l + (c_p)_g \langle \rho_g \vec{u}_g \rangle \right] \nabla \langle T \rangle + i_{lg} \langle \dot{n} \rangle \\ & = \nabla \cdot \left\{ \nabla \cdot \left[k_l \varepsilon S + k_g \varepsilon (1-S) + k_s (1-\varepsilon) \right] \langle T \rangle \right. \\ & \quad \left. + \frac{k_s - k_l}{V} \int_{A_{sl}} T_s \vec{n}_{sl} dA + \frac{k_l - k_g}{V} \int_{A_{lg}} T_l \vec{n}_{lg} dA + \frac{k_g - k_s}{V} \int_{A_{gs}} T_g \vec{n}_{gs} dA \right\} \\ & + (\rho c_p)_l \nabla \langle u'_l T'_l \rangle - \nabla (c_p)_g \langle \rho'_g u'_g T_g \rangle + \langle \dot{q} \rangle \quad (2.17) \end{aligned}$$

Onde:

i_{lg} = calor latente dos gases condensáveis =

$$i_{lg} = (\rho cp)_g + (\rho cp)_l \quad (2.18.a)$$

$$\langle \dot{n} \rangle = \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} T_l (\bar{u}_l - \bar{w}) \bar{n}_{lg} dA \quad (2.18.b)$$

\bar{w} = velocidade interfacial líquido - gás

$$\langle \dot{q} \rangle = \langle \dot{q}_l \rangle + \langle \dot{q}_g \rangle + \langle \dot{q}_s \rangle + \frac{\partial (c_p)_g}{\partial t} \langle \rho'_g T'_g \rangle \quad (2.19)$$

2.2 - Condutividade térmica efetiva e tensor de dispersão

Pode-se definir o tensor condutividade térmica efetiva,

\bar{k}_e , como sendo:

$$\begin{aligned} \bar{k}_e = & \left[k_l \varepsilon S + k_g \varepsilon (1-S) + k_s (1-\varepsilon) \right] + \frac{k_s - k_l}{V} \int_{A_{sl}} \bar{n}_{sl} \bar{b}_s dA + \frac{k_l - k_g}{V} \int_{A_{lg}} \bar{n}_{lg} \bar{b}_l dA + \\ & + \frac{k_g - k_s}{V} \int_{A_{gs}} \bar{n}_{gs} \bar{b}_g dA \end{aligned} \quad (2.20)$$

Onde:

\bar{b}_x = é um tensor auxiliar que descreve a temperatura de

flutuação, T , em função da temperatura média $\langle T \rangle$,

onde x corresponde as fases sólida,(s), líquida,

(l), e gasosa, (g), respectivamente.

Onde pode-se definir um tensor da condutividade térmica efetiva total, D , que é dado por:

$$D = \frac{\bar{k}_e}{(\rho c_p)_l} + \bar{D}^d \quad (2.25)$$

No presente estudo, o efeito convectivo é desprezível, pois a temperatura máxima observada na bancada de experimentos não excedeu a 38 °C e o gradiente de temperatura obtido entre as superfícies não ultrapassou 8°C. Além disso, a duração de cada experimento é baixa ($t = 720s$), o que impede o surgimento de efeitos convectivos. O termo fonte, $\langle \dot{q} \rangle$, é nulo pois não tem geração de calor, então a Eq. (2.24) se reduz a:

$$\left[(1 - \varepsilon)(\rho c_p)_s + \varepsilon S(\rho c_p)_l + \varepsilon (1 - S)\langle \rho \rangle^v (c_p)_v + \varepsilon (1 - S)\langle \rho \rangle^a (c_p)_a \right] \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} = \nabla \cdot [D] \bar{\nabla} \langle T \rangle - i_{lg} \langle \dot{n} \rangle \quad (2.26)$$

Denominando calor específico efetivo, $(\rho c_p)_e$, como:

$$(\rho c_p)_e = \left[(1 - \varepsilon)(\rho c_p)_s + \varepsilon S(\rho c_p)_l + \varepsilon (1 - S)\langle \rho \rangle^v (c_p)_v + \varepsilon (1 - S)\langle \rho \rangle^a (c_p)_a \right] \quad (2.27)$$

O termo $i_{lg}\langle\dot{m}\rangle$ corresponde ao termo de mudança de fase, que é expresso em termos da entalpia, Δh_v , que é entalpia por unidade de massa de água evaporada. Assim, a equação (2.26) torna-se:

$$\left(\rho c_p\right)_e \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D \bar{\nabla} T) - \langle\dot{m}\rangle \Delta h \quad (2.28)$$

Onde:

$\langle\dot{m}\rangle$ = é a quantidade de água que se evapora por unidade de volume e tempo do meio poroso.

Δh = variação de entalpia armazenada sob a forma latente dentro da fase gasosa.

2.3 - Análise da água evaporada na fase gasosa

Dentro da publicação de Azizi et al. (1989), é descrita uma análise clássica onde se considera que o aumento da condutividade térmica gasosa, k_g , se dá segundo o acréscimo de

uma condutividade térmica "difusiva", λ_{dif} , devido ao movimento do vapor dentro dos poros causado pelo calor latente, Δh_v , (supondo que o ar está parado). Dentro da fase gasosa, a quantidade de água que se evapora por unidade de volume e de tempo no interior do volume elementar, $\langle \dot{m} \rangle$, é dada pela equação fundamental da difusão molecular, unidimensional, conhecida como lei de Fick mais a taxa temporal de formação do vapor, juntamente com o efeito convectivo. Então, $\langle \dot{m} \rangle$, pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \langle \rho_v \rangle}{\partial t} + \bar{V} \langle \rho_v \bar{v}_g - \rho_g \mathcal{D}_v \bar{V} W_v \rangle = \langle \dot{m} \rangle \quad (2.29)$$

Onde:

ρ_v = densidade do vapor;

ρ_g = densidade da fase gasosa;

\mathcal{D}_v = coeficiente de difusão binária ar-vapor;

$W_v = \frac{\rho_v}{\rho} =$ fração mássica.

O primeiro termo da Eq. (2.29) corresponde a taxa temporal de formação de vapor. O segundo termo é desprezível, pois não existe o termo convectivo.

Portanto, pode-se escrever a Eq. (2.29) da seguinte forma:

$$\langle \dot{m} \rangle = \bar{V} \left\langle -\rho_g \mathcal{D}_v \frac{\bar{V} W_v}{1 - W_v} \right\rangle = \bar{V} \langle \dot{n}_v \rangle \quad (2.30)$$

Onde:

$[1 - W_v]$ = quantidade de água que não sofreu evaporação.

Introduzindo a lei dos gases perfeitos, para simplificação da Eq. (2.30), vem:

$$PV = \frac{m_v}{M_v} RT \quad (2.31)$$

$$\rho_v = \frac{m_v}{V_v} \quad (2.32)$$

Onde:

P = pressão total do meio poroso;

M_v = massa molecular do vapor;

m_v = massa de vapor;

R = constante universal dos gases;

ρ_v = densidade do vapor.

Pode-se escrever a Eq. (2.30) em termos de pressão,

tornando-se:

$$\langle \dot{m} \rangle = \bar{V} \left\langle -\rho_g \cdot \mathcal{D}_v \frac{\bar{V} \left(\frac{P_v}{P} \right)}{1 - \left(\frac{P_v}{P} \right)} \right\rangle = \bar{V} \langle \dot{n}_v \rangle \quad (2.33)$$

Substituindo as equações, (2.31), (2.32) na (2.33) tem-

se:

$$\langle \dot{n}_v \rangle = -\frac{PM_v}{RT} \frac{\mathcal{D}_v}{1 - \left(\frac{P_v}{P} \right)} \bar{V} \left(\frac{P_v}{P} \right) \bar{V} \langle T \rangle \quad (2.34)$$

Supondo que a pressão total, P , seja uniforme e dentro do equilíbrio termodinâmico a pressão de vapor, P_v , seja igual a pressão de vapor saturada, P_{vs} , que somente depende da temperatura pode-se escrever:

$$-\lambda_{dif} \bar{V} T = \Delta h \langle \dot{m} \rangle \quad (2.35)$$

$$-\lambda_{dif} \bar{V} T = \Delta h \bar{V} \langle \dot{n} \rangle \quad (2.36)$$

$$\lambda_{dif} = \mathcal{D}_v \frac{\Delta h}{RT} \frac{M_v}{1 - \left(\frac{P_{vs}}{P} \right)} \frac{dP_{vs}}{dT} \bar{V} \langle T \rangle \quad (2.37)$$

Então pode-se definir uma condutividade térmica aparente, k , que é dada por:

$$k = D + f\lambda_{dif} \quad (2.39)$$

2.4 - Equação da Condução de calor no meio poroso

Portanto a equação (2.38) pode ser escrita como:

$$(\rho c_p)_e \frac{\partial T}{\partial t} = k \bar{\nabla}^2 T \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{(\rho c_p)_e} \bar{\nabla}^2 T \quad (2.41)$$

$$\alpha = \frac{k}{(\rho c_p)_e} \quad (2.42)$$

Então:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \bar{\nabla}^2 T \quad (2.43)$$

A equação da condução de calor, Eq. (2.43), é facilmente resolvida e descreve satisfatoriamente o meio poroso em questão. Deste modo, utiliza-se o método de estimação de parâmetros para o cálculo da difusividade térmica, α , e a condutividade térmica, k , utilizando-se a solução analítica da Eq. (2.43) como o modelo teórico para o campo de temperatura no meio.

Da Eq. (2.43) pode-se fazer simplificações para facilitar sua solução, considerando que o fluxo imposto na amostra tem direção unidimensional, x , como mostra a figura (2.1).

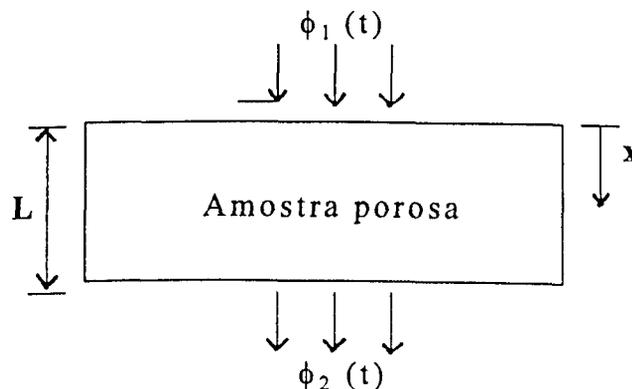


Figura 2.1: Fluxo de calor imposto na amostra porosa.

A equação (2.43) torna-se:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.44)$$

Com as seguintes condições de contorno e inicial:

Condições de contorno:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \phi_1(t) \quad (2.45)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \phi_2(t) \quad (2.46)$$

E a condição inicial:

$$T(x,0) = T_0 \quad (2.47)$$

2.5 - Solução analítica do problema proposto

Nas Eqs.(2.44 a 2.47), $\phi_1(t)$ e $\phi_2(t)$ são os fluxos de calor medidos nas superfícies da amostra através dos transdutores de calor. Obtém-se a solução do problema dado pela Eq. (2.44) usando a técnica baseada nas funções de Green, transformando-o num problema auxiliar, onde $G(x,t/x',t)$ é a função de Green. Assim, o perfil de temperatura pode ser dado por:

$$\begin{aligned}
T(x,t) = & \int_0^L G(x,t/x',\tau)_{\tau=0} \cdot T_0 \cdot dx' + \alpha \int_0^t G(x,t/x',\tau)_{x'=0} \frac{\phi_1(\tau)}{k} d\tau + \\
& + \alpha \int_0^t G(x,t/x',\tau)_{x'=L} \frac{\phi_2(\tau)}{k} d\tau
\end{aligned} \tag{2.48}$$

O problema auxiliar fica:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial G}{\partial t} \tag{2.49}$$

Sujeito às condições de contorno:

$$-k \frac{\partial G}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \tag{2.50}$$

$$-k \frac{\partial G}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \tag{2.51}$$

E a condição inicial:

$$G(x,0) = T_0 \tag{2.52}$$

Obtém-se a solução do problema auxiliar dado pela equação (2.45) através do uso da técnica de separação de variáveis que é dada como:

$$G(x,t) = \int_0^L \left[\int_0^L \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-(\beta_m)^2 \alpha t / L^2} \cos(\beta_m \cdot x / L) \cos(\beta_m x' / L) \right] T_0 dx' \quad (2.53)$$

Onde β_m são os auto valores definidos por $\beta_m = m\pi$, com $m=1,2,3,\dots$

A função de Green completa é obtida substituindo a variável t por $t-\tau$, na equação (2.53). Avaliando as funções de Green nas condições de contorno, têm-se:

$$G(x,t/x',\tau) \Big|_{\tau=0} = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-(\beta_m)^2 \alpha t / L^2} \cos(\beta_m \cdot x / L) \cos(\beta_m \cdot x' / L) \quad (2.54)$$

$$G(x,t/x',\tau) \Big|_{x'=0} = \frac{1}{L} \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-(\beta_m)^2 \alpha (t-\tau) / L^2} \cos(\beta_m \cdot x / L) \right] \quad (2.55)$$

$$G(x, t / x', \tau) \Big|_{x'=L} = \frac{1}{L} \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-(\beta_m)^2 \alpha (t-\tau) / L^2} \cos(\beta_m \cdot x / L) \right] \quad (2.56)$$

Substituindo a função de Green na Eq.(2.48) obtém-se a solução geral:

$$\begin{aligned} T(x, t) = T_0 + (\alpha / L \cdot k) \int_0^t \phi_1(\tau) d\tau + (2\alpha / L \cdot k) \sum_{m=1}^{\infty} e^{-(\beta_m)^2 \alpha t / L^2} \times \\ \times \cos(\beta_m x / L) \int_0^t e^{-(\beta_m)^2 \alpha \tau / L^2} \phi_1(\tau) d\tau + (\alpha / L \cdot k) \int_0^t \phi_2(\tau) d\tau + (2\alpha / L \cdot k) \\ \times \sum_{m=1}^{\infty} [(-1)^m - 1] e^{-(\beta_m)^2 \alpha t / L^2} \cos(\beta_m x / L) \times \int_0^t e^{-(\beta_m)^2 \alpha \tau / L^2} \phi_2(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.57)$$

As funções $\phi_1(t)$ e $\phi_2(t)$ são obtidas a partir de curvas de ajuste sobre os valores medidos com os transdutores de calor aplicados nas superfícies da amostra.

As propriedades termofísicas, condutividade térmica e difusividade térmica, foram estimadas pela minimização de uma função soma quadrática, na qual se compara um valor de

temperatura experimental com um valor teórico que é obtido a partir da Eq. (2.57).Primeiramente, obteve-se resultados para amostras porosas isentas de umidade, para se ter melhor controle sobre o sistema em estudo, depois colocou-se a umidade desejada com a fonte de calor na superfície superior da amostra de modo a minimizar, se existisse, o efeito convectivo do fluido, permitindo assim obter um melhor controle destas propriedades termofísicas. Posteriormente, com a fonte de calor embaixo da amostra porosa, foi possível observar a existência ou não de convecção na amostra em estudo e como ela poderia interferir nas medidas levantadas.

Capítulo 3

3 - MODELAGEM EXPERIMENTAL

3.1 - Conceitos e Fundamentos

Parker et all (1961) foram uns dos primeiros a descrever um método transiente para obter a difusividade térmica através do método denominado flash, que consiste em utilizar um pulso de calor de alta intensidade e curta duração sobre a superfície da amostra onde mede-se o perfil de temperatura na face oposta ao fluxo, sempre mantendo esta superfície termicamente isolada. Este pulso de calor necessita de um gerador a laser de alta sensibilidade e de resposta rápida, tornando o experimento muito caro e limitando a espessura da amostra porosa devido ao fluxo de calor de curta duração. Para determinar a condutividade térmica no método flash se faz necessário conhecer o valor do fluxo de calor imposto na face frontal da amostra, o que não é necessário para a obtenção da difusividade térmica.

Uma outra técnica usada na medição das propriedades térmicas é o método do fio quente, apresentado primeiramente por Blackwell (1954) que consiste na inserção de um elemento filiforme, sonda, no centro axial da amostra com a função de dissipar calor por efeito Joule e para medir a temperatura no interior da mesma atuando como um termômetro de resistência. Este método é utilizado para medir propriedades térmicas de sólidos e líquidos e possui desvantagens como a dificuldade prática de inserção da sonda no meio investigado tornando o método de caráter destrutivo.

No método proposto neste trabalho utiliza-se dois transdutores de fluxo de calor de rápida resposta e de alta sensibilidade desenvolvidos por Leclerq & Thery (1983), dois termopares superficiais e um termopar interno à amostra porosa para a obtenção de dados da evolução transiente dos fluxos de calor e temperaturas na amostra. Um aquecedor resistivo baseado no efeito joule é usado para aquecer a superfície frontal da amostra porosa.

3.2 - Descrição da Bancada Experimental

O aparato experimental utilizado, proposto por Guimarães (1993a), é mostrado na Fig. (3.1.a) juntamente com as condições de contorno descrita na Fig. (3.1.b).

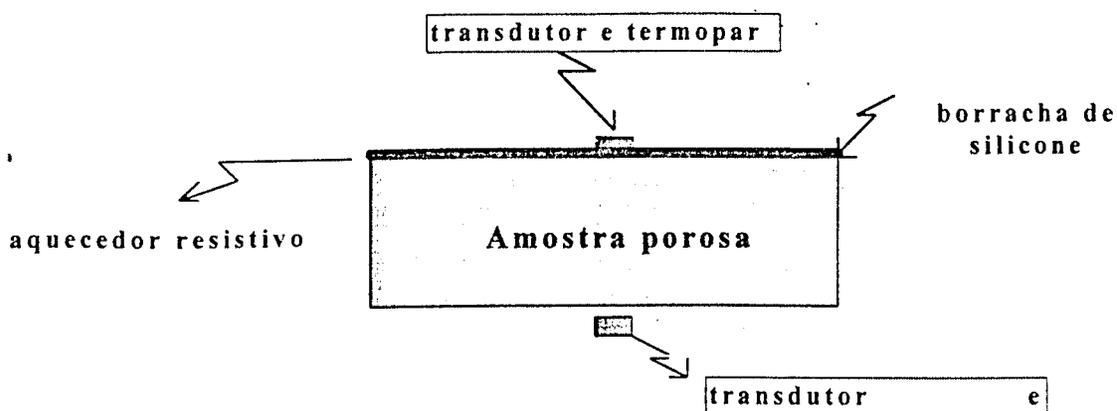


Figura 3.1.a) Montagem experimental.

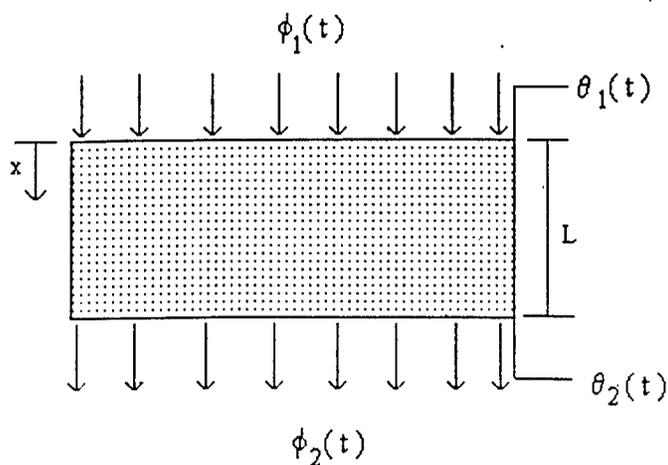


Figura 3.1.b) A amostra porosa submetida às condições de contorno.

Este método envolve a aplicação de um fluxo de calor uniforme e unidimensional num instante inicial, $t = 0$, na superfície superior da amostra, $x = 0$, sujeita inicialmente a uma temperatura uniforme, T_0 . As condutividades térmicas e

difusividades térmicas são calculadas a partir do modelo matemático, dos dados adquiridos e da espessura da amostra porosa. A fonte de calor é um aquecedor resistivo baseado no efeito joule, revestido externamente com uma borracha de silicone do tipo wire-wound com dimensões 305x305x1,40 mm e especificações de potência de 720 w, fabricado pela Watlon Electric Co. Os transdutores de fluxo de calor possuem dimensões 50x50 mm, espessura inferior a 0,3 mm e constante de tempo inferior a 10 ms, desenvolvido pelo CREMAT, Centre de Recherche en Science des Materiaux e Techniques de Construction da Universidade de Lille (1993), previamente calibrados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina. (Guimarães (1993a)). Os campos de temperatura nas superfícies e interior da amostra foram medidos por termopares tipo k, calibrados no LTCM, Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia. Uma lâmina de silicone, de dimensões 305x305x3 mm é usada para preenchimento das bolsas de ar existentes entre o aquecedor e a amostra porosa diminuindo a resistência de contato que existe principalmente devido aos efeitos da rugosidade da superfície. Esta lâmina de silicone auxilia também no contato térmico entre fluxímetros e termopares. A Fig. (3.2) apresenta a bancada experimental.

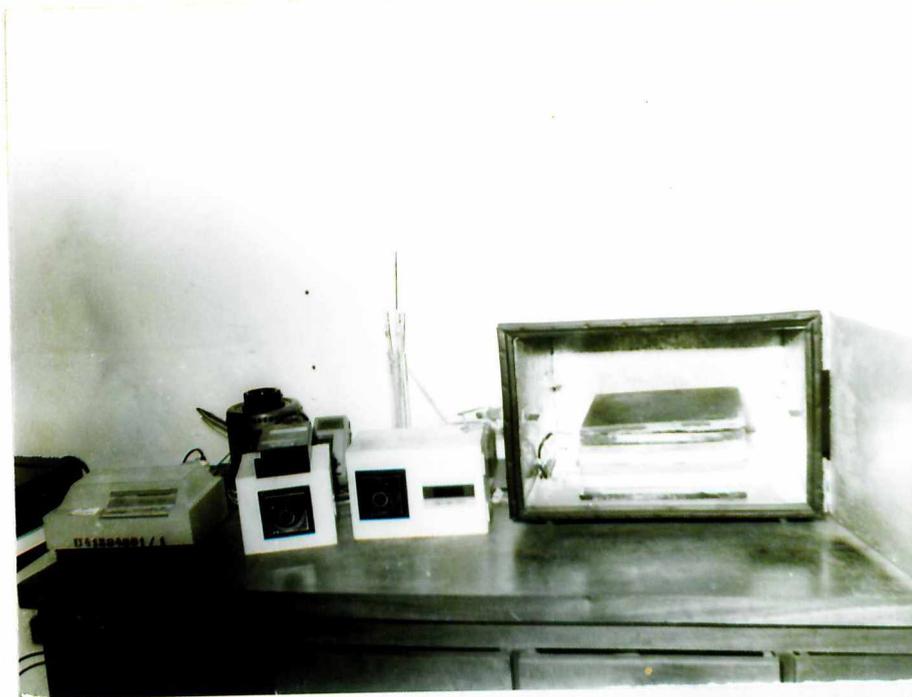


Figura 3.2) Aparato experimental.

3.3 - Construção do Meio Poroso

Os meios porosos foram construídos através da sinterização de esferas de vidro possuindo cada tipo uma faixa de diâmetro das esferas. Foram formados três tipos de amostra porosa:

- a) amostra porosa (C) de diâmetro entre 05 - 09 mm, $\epsilon = 0,20$ (Fig. (3.3));
- b) amostra porosa (B) de diâmetro entre 08 - 12 mm, $\epsilon = 0,24$ (Fig. (3.4));
- c) amostra porosa (A) de diâmetro entre 10 - 14 mm, $\epsilon = 0,36$ (Fig. (3.5)).

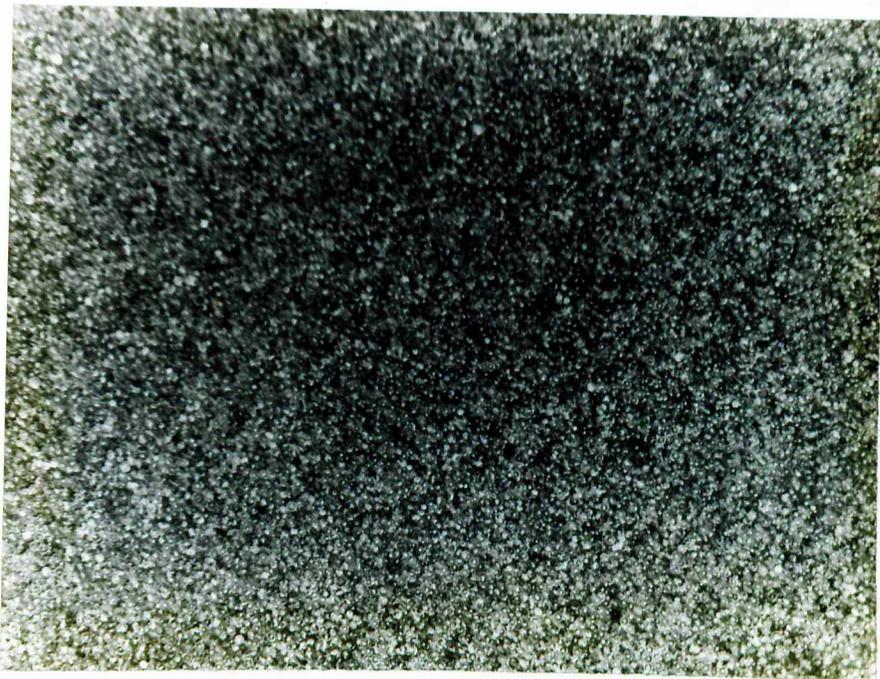


Figura 3.3) Meio poroso de diâmetro 05-09 mm e $\varepsilon = 0,20$.

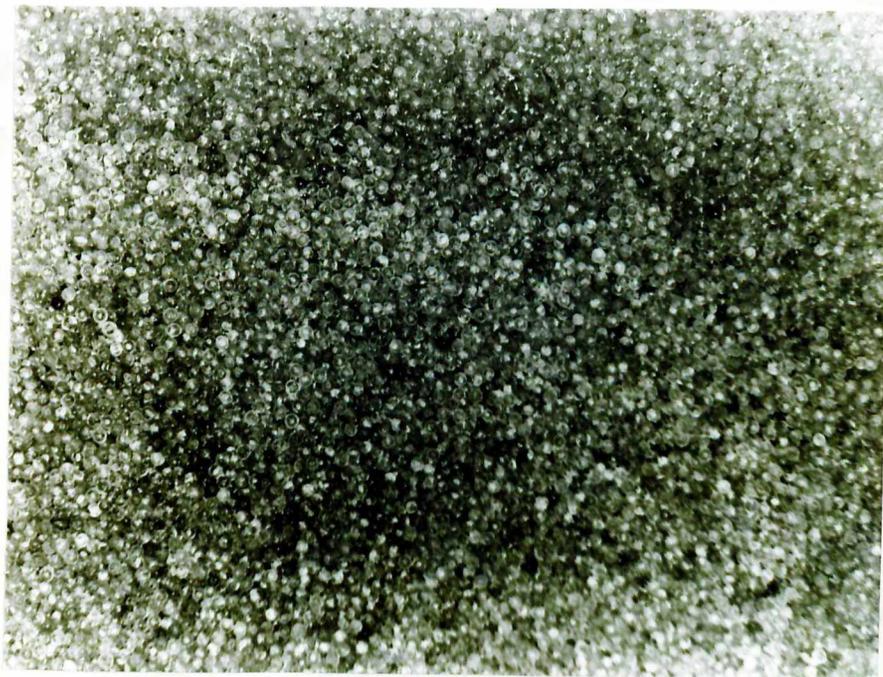


Figura 3.4) Meio poroso de diâmetro 08-12 mm, $\varepsilon = 0,24$.

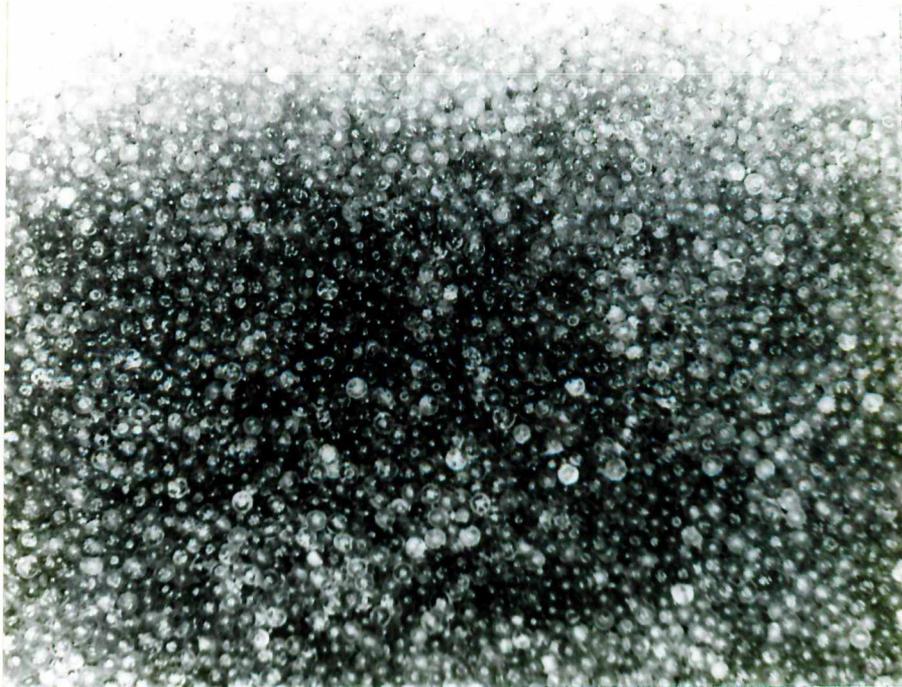


Figura 3.5) Meio poroso de diâmetro 10-14 mm e $\varepsilon = 0,36$.

Na sinterização destas esferas de vidro para a formação do meio poroso construiu-se uma forma de aço de 300x300x4 mm com uma tampa de aço com peso considerável para compactar melhor as esferas de vidro dentro do meio, como mostra a Fig. (3.6) e levado a um sinterizador a 700° C por duas horas.

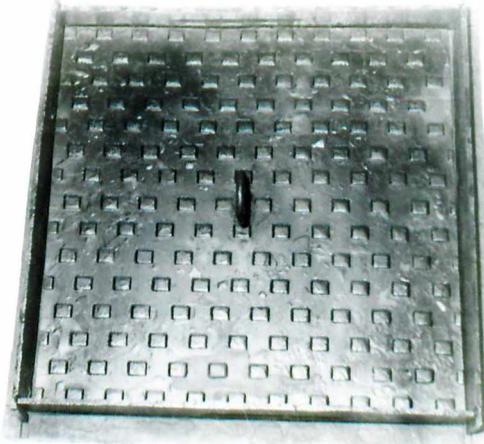


Figura 3.6) Fôrma de aço padrão usada para a formação do meio poroso.

Para a obtenção da temperatura de sinterização passou-se por vários processos de prova com a fôrma de aço de menor dimensão mostrada na Figura (3.7).



Figura 3.7) Fôrma de aço usada para os experimentos iniciais do cálculo da temperatura e tempo de sinterização.

As fôrmas foram construídas com as mesmas dimensões que a fonte de calor para evitar erros de medidas, Fig. (3.8), pois o modelo teórico proposto necessita de fluxo de calor unidimensional. Com estas dimensões, a fuga lateral de calor é minimizada, como mostra a Fig. (3.9).

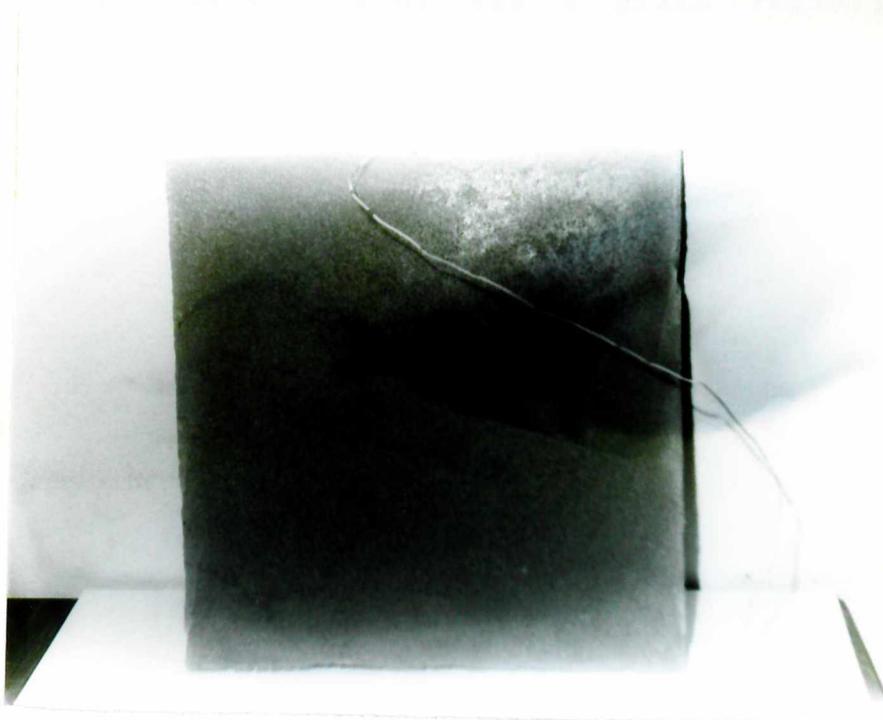


Figura 3.8) Amostra porosa padrão $\phi = 08-12$ mm, $\epsilon = 0,24$.

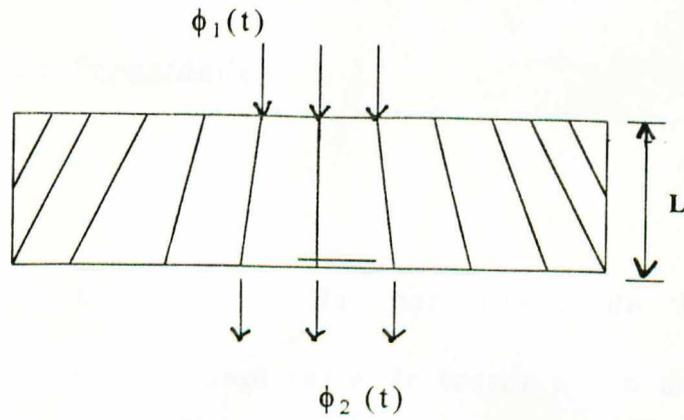


Figura 3.9) Correntes de fluxo de calor dentro da amostra com dimensão menor que a placa resistiva de calor.

A Fig. (3.10) mostra a fôrma padrão de $\phi = 10-14$ mm e $\varepsilon = 0,36$ com maior detalhe.

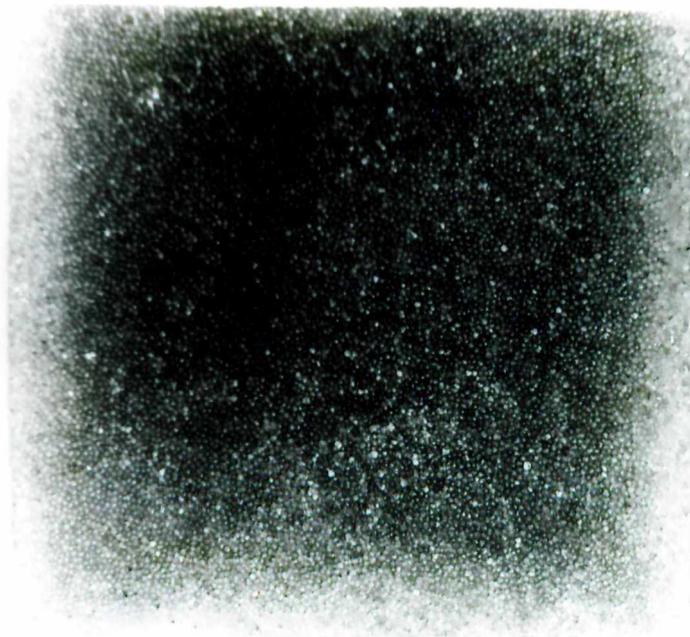


Figura 3.10) Novo ângulo da amostra de diâmetro 10-14 mm.

3.4 - Cálculo da Porosidade

Para a obtenção da porosidade do meio poroso estudado, foi necessária uma série de testes a fim de se chegar a um valor médio da porosidade, pois, o processo de sinterização interfere no valor da porosidade.

A porosidade (ϵ) consiste em um valor adimensional que determina a porcentagem de vazios (interstícios) que existe em um meio poroso. As amostras são caracterizadas pelo valor da porosidade e quanto de vazio está sendo preenchido com água (saturação). Foram usados quatro métodos diferentes para se determinar a porosidade, sendo eles:

- Medida do volume de vazio, por embebição da estrutura porosa por um líquido.

$$\epsilon = \frac{V_l}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

ε = porosidade.

V_1 = volume do líquido que preenche os espaços vazios.

V = volume ocupado pelas esferas de vidro, volume cheio.

- Relação de densidade da estrutura porosa e o material constituinte da matriz sólida.

$$\varepsilon = \frac{V_s}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

V_s = volume ocupado pelo sólido.

- Relação de áreas dos poros e matriz sólida em determinadas regiões do meio poroso, tomadas no laboratório de metrologia.

$$\varepsilon = \frac{A_v}{A_e} \quad (3.3)$$

Onde:

A_e = área de esferas.

A_v = área de vazios.

- Pesagem da amostra seca e amostra úmida.

$$m_s - m_m = m_v \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \frac{m_v}{m_s} \quad (3.5)$$

Onde:

m_s = massa da amostra porosa saturada (cheia de água).

m_m = massa da matriz porosa seca.

m_v = massa de água (vazios) da matriz porosa.

Os quatro métodos foram utilizados para a confirmação do valor da porosidade. O último método foi realizado após o término da aquisição de medidas para não haver molhamento da amostra porosa antes dos levantamentos de dados.

3.5 - Desenvolvimento Experimental

As condutividades e difusividades térmicas são calculadas através do método de estimação de parâmetros que consiste de uma técnica no domínio do tempo, segundo Beck e Arnold (1977), a qual possui as seguintes etapas de procedimento:

1. Tendo estabelecido o modelo teórico e sua solução analítica, dada pela Eq. (2.57), a estimativa dos parâmetros, condutividade térmica (k) e difusividade térmica (α), se faz com um valor inicial de k e α que através do método iterativo usa os valores medidos de temperaturas experimentais obtidas na superfície e interior da amostra comparadas com as temperaturas teóricas obtidas da Eq. (2.57). As temperaturas teóricas são comparadas com as temperaturas experimentais, onde quanto menor a diferença entre elas, melhor a estimativa das propriedades termofísicas.
2. Estima-se a condutividade térmica e difusividade térmica minimizando-se a função soma quadrática:

$$S = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 (Y_{ji} - T_{ji})^2 \quad (3.6)$$

Onde:

Y_{ji} = Temperaturas experimentais;

T_{ji} = Temperaturas calculadas através do modelo teórico;

i = números de sensores ;

j = instante discreto de medição.

Através da minimização da função S e usando o método de Gauss tem-se as equações de recorrência para a obtenção de k e α , obtidas por Guimarães (1993a).

Logo, minimizando S vem:

$$\frac{\partial S}{\partial k} = 2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 (Y_{ji} - T_{ji}) \frac{\partial T_i}{\partial k} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 (Y_{ji} - T_{ji}) \frac{\partial T_i}{\partial \alpha} \quad (3.8)$$

E definindo:

$$X_{ik} = \frac{\partial T_i}{\partial k} \quad (3.9)$$

$$X_{i\alpha} = \frac{\partial T_i}{\partial \alpha} \quad (3.10)$$

Onde os X_{ik} e $X_{i\alpha}$ são coeficientes de sensibilidade. Estes coeficientes têm papel importante na estimação das propriedades e na otimização do projeto experimental. Através de uma análise prévia desses coeficientes pode-se detectar possíveis áreas de dificuldade na estimação de parâmetros.

Capítulo 4

4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1- Apresentação dos resultados

Para cada tipo de amostra porosa, foram realizados vários experimentos. A repetibilidade dos valores obtidos é muito importante para se obter um bom resultado, pois a resistência de contato existente entre os termopares e transdutores com a amostra porosa interferem nos valores obtidos, levando a obtenção de dados incorretos. Esta resistência de contato surge devido aos efeitos de rugosidade da superfície e presença de ar nos vazios da amostra porosa.

Os dados coletados foram obtidos de três amostras porosas diferentes que são:

- Amostra porosa (A) que possui diâmetro, $\phi = 10 - 14$ mm, porosidade, $\epsilon = 0,36$, e espessura, $L = 11,70 \times 10^{-03}$ m.
- Amostra porosa (B) que possui diâmetro, $\phi = 08 - 12$ mm, porosidade, $\epsilon = 0,24$, e espessura, $L = 13,85 \times 10^{-03}$ m.
- Amostra porosa (C) que possui diâmetro, $\phi = 05 - 09$ mm, porosidade, $\epsilon = 0,20$, e espessura, $L = 14,70 \times 10^{-03}$ m.

Primeiramente trabalhou-se a amostra porosa seca para se ter maior domínio sobre o meio e levantar os parâmetros desejados sem a interferência da umidade que altera as propriedades termofísicas do meio.

Os dados da Tabela 4.1, apresentam os valores máximos e mínimos das propriedades térmicas, k e α , obtidas a partir de várias estimações. A confiabilidade dos resultados é baseada na expressão da minimização dada pela Eq. (3.6) e pela repetibilidade dos resultados.

Os valores máximos e mínimos dos parâmetros estimados estão dentro da faixa de incerteza desenvolvida no Capítulo 5.

Tabela 4.1: Apresentação dos valores dos parâmetros estimados máximo, mínimo e médio para os três tipos de amostras porosas.

Parâmetros estimados	Amostra porosa A	Amostra porosa B	Amostra porosa C
$k_{\text{mínimo}}$	0.2866 w/m.k	0.3637 w/m.k	0.3989 w/m.k
$k_{\text{máximo}}$	0.3281 w/m.k	0.4014 w/m.k	0.4307 w/m.k
$k_{\text{médio}}$	0.3142 w/m.k	0.3807 w/m.k	0.4125 w/m.k
$\alpha_{\text{mínimo}}$	$1.359 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.148 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.071 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$
$\alpha_{\text{máximo}}$	$1.836 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.354 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.173 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$
$\alpha_{\text{médio}}$	$1.636 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.261 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.113 \cdot 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$

São mostrados os perfis de fluxo de calor e temperatura nas Figs. (4.1), (4.2) e (4.3), para a amostra porosa (B) seca e utilizando como exemplo um único experimento onde se obteve os valores estimados de k e α máximos com a imposição da fonte de calor na superfície superior da amostra. O fluxo de calor da superfície frontal da amostra, Q_1 , é mostrado na Fig. (4.1) e o fluxo de calor resultante da superfície oposta à fonte de calor, Q_2 , é mostrado na Fig. (4.2).

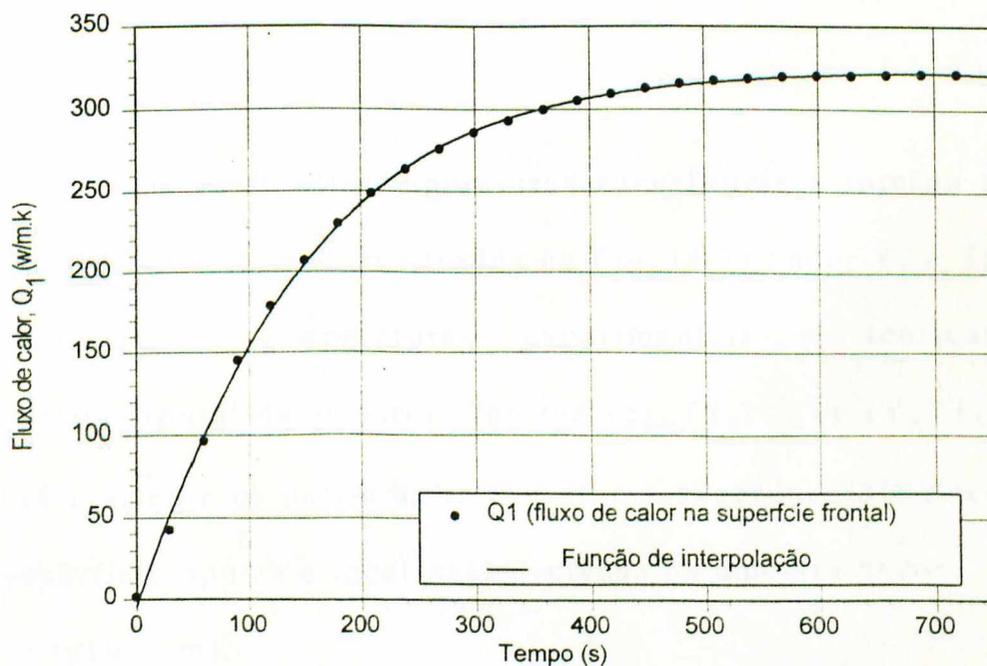


Figura 4.1: Fluxo de calor na superfície frontal da amostra porosa (B).

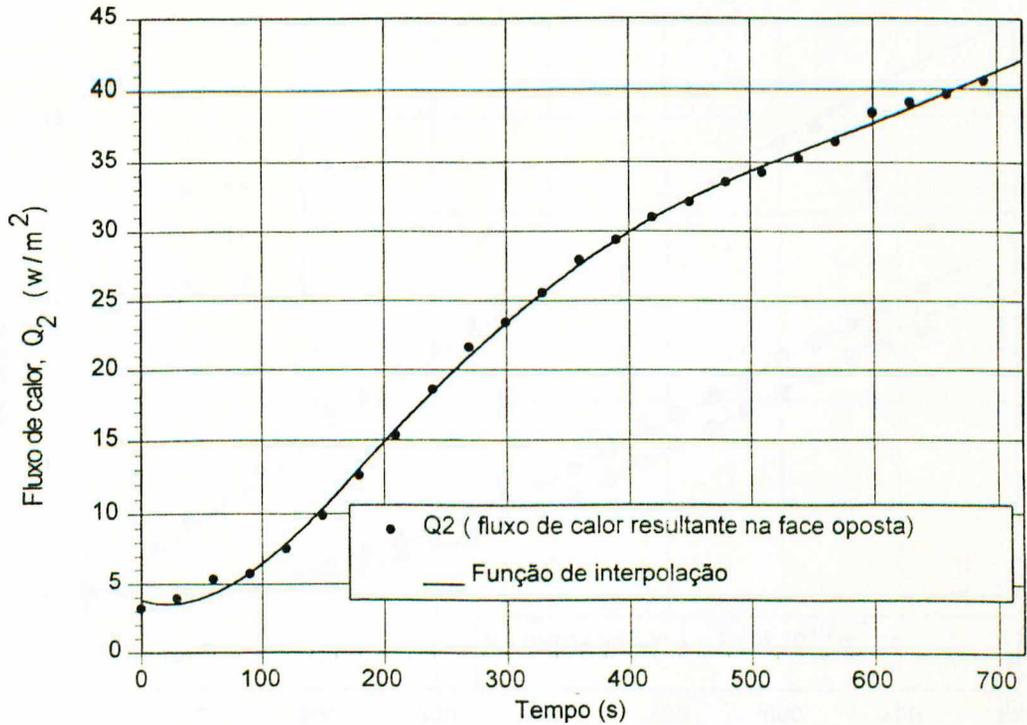


Figura 4.2: Fluxo de calor na superfície oposta à fonte de calor da amostra porosa (B).

Os perfis de temperaturas superficiais e interna a esta amostra porosa (B), são mostrados na Fig. (4.3) onde, Y_1 e T_1 , são respectivamente temperaturas experimentais e teóricas na superfície frontal da amostra. Por sua vez, (Y_2, T_2) e (Y_x, T_x) , são respectivamente os perfis de temperaturas experimentais e teóricas na superfície oposta e localização interna na amostra porosa ($x = 1 \times 10^{-02}$ m).

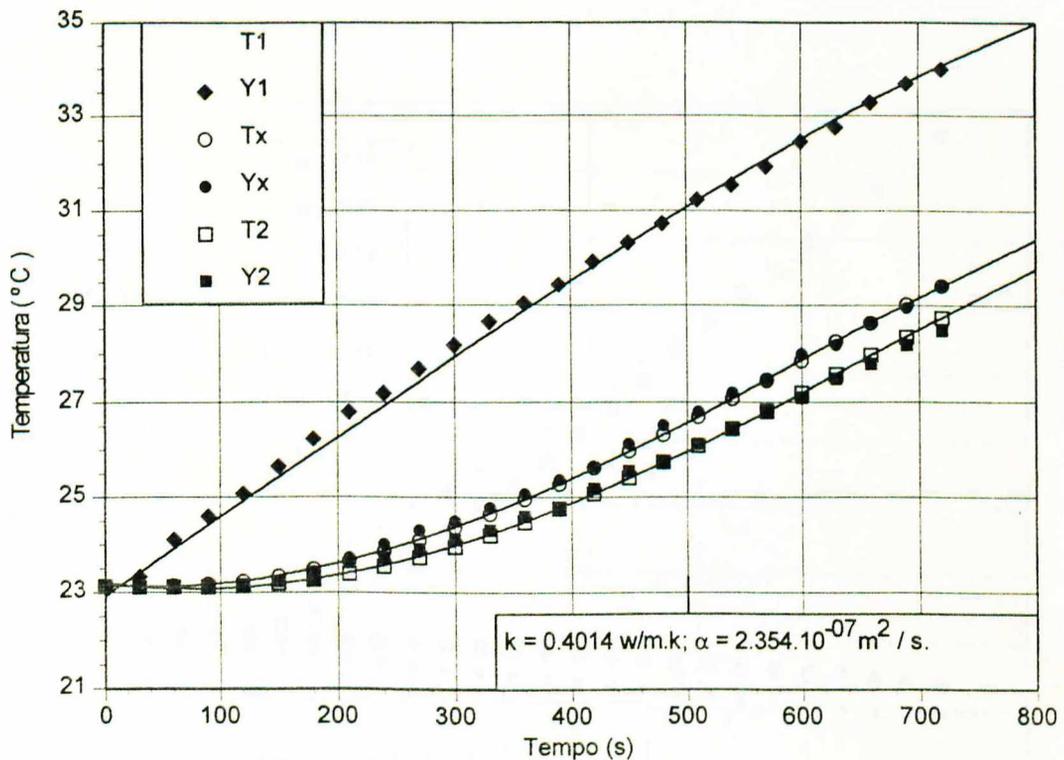


Figura 4.3: Perfis de temperaturas teóricas e experimentais na superfície superior, inferior e interna da amostra porosa (B).

A Fig. (4.4) mostra, ainda para a amostra porosa (B), os coeficientes de sensibilidade em função do tempo de cada parâmetro, k e α , em cada posição de medida. O dígito 1 indica a superfície frontal à fonte de calor, o dígito 2 indica a superfície oposta à fonte de calor e o dígito x indica a parte interna à amostra porosa.

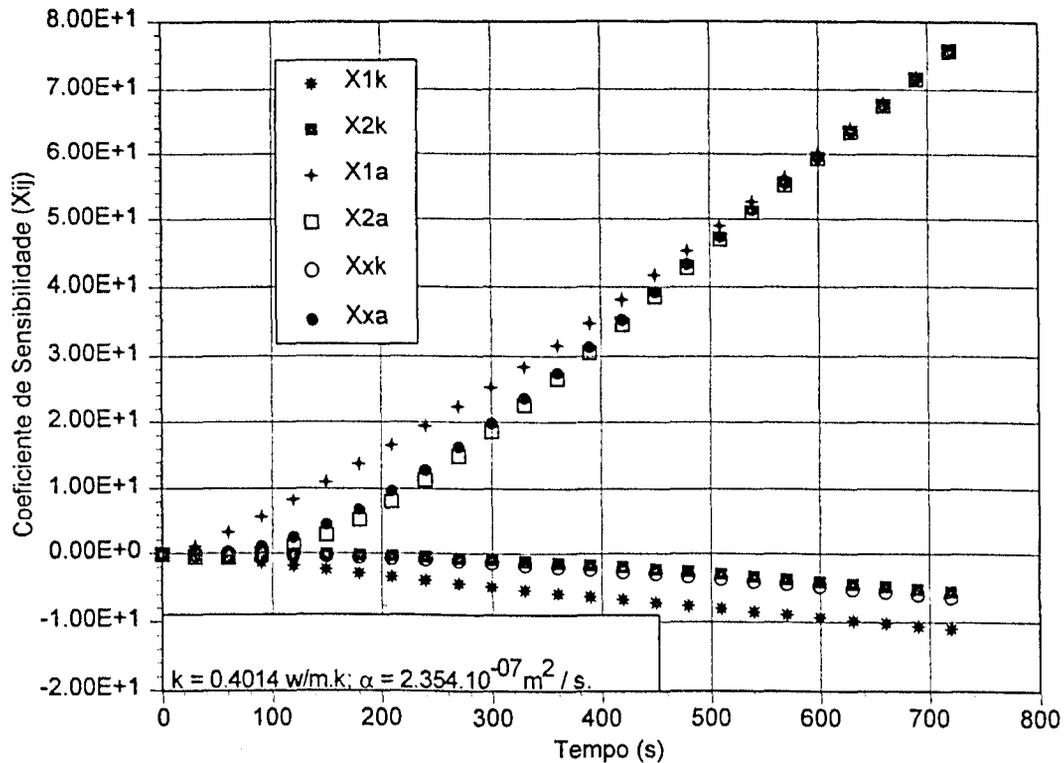


Figura 4.4: Coeficientes de sensibilidade para cada um dos parâmetros, k e α , em cada posição dos termopares da amostra porosa (B).

Os coeficientes de sensibilidade são definidos como a primeira derivada dependente da temperatura, com respeito ao parâmetro desejado, como a condutividade térmica, k , e difusividade térmica, α . Se estes coeficientes são pequenos ou correlacionados uns com outros, o problema é bastante sensível a erros de medição. Os coeficientes de sensibilidade, X_{ik} e $X_{i\alpha}$, devem ser linearmente independentes e possuírem os maiores valores possíveis para que possibilite a estimação simultânea de k e α . [Guimarães & Philippi (1994)].

Em cada experimento realizado são desprezados os tempos anteriores a 300s para a estimação dos parâmetros devido a linearidade inicial existente entre os coeficientes. Pode-se observar através da Fig. (4.4), que os coeficientes acima de 300s possuem comportamentos independentes.

Portanto, a partir de tempo igual a 300 s, pode-se afirmar que os coeficientes de sensibilidade não estão intercorrelacionados, indicando uma melhor condição para a estimação de k e α .

A amostra porosa (A) seca possui perfis de fluxos de calor iguais aos mostrados nas Fig. (4.1) e (4.2) com a imposição da fonte de calor na superfície superior da amostra porosa. Os perfis de temperaturas e coeficientes de sensibilidades são mostrados nas Fig. (4.5) e Fig. (4.6) respectivamente.

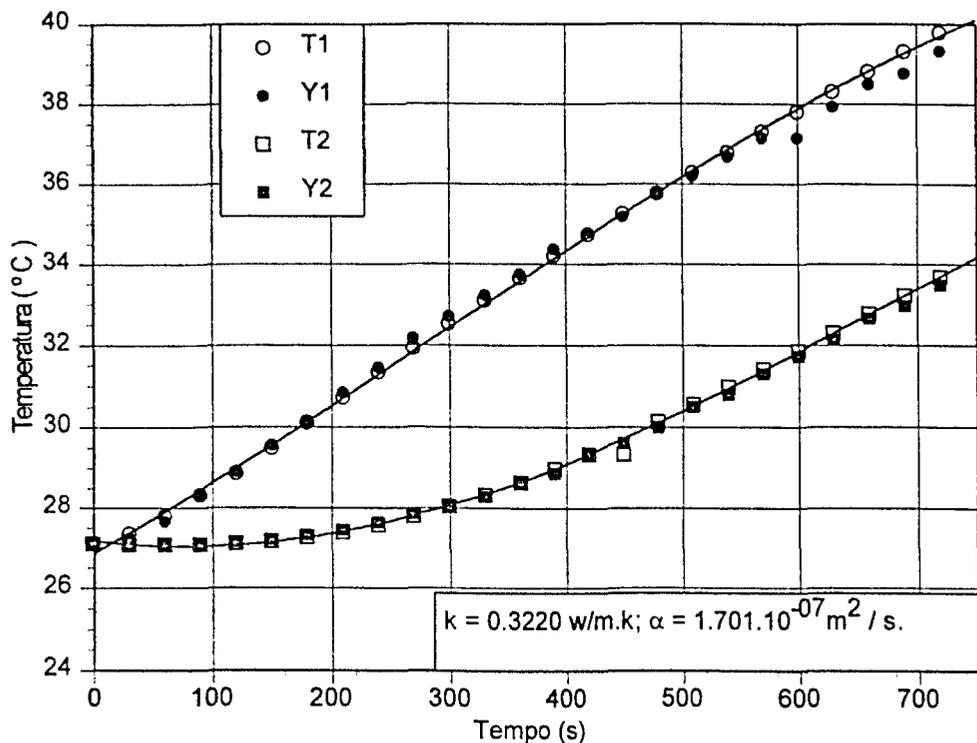


Figura 4.5: Perfis de temperaturas teóricas e experimentais (Amostra porosa (A)).

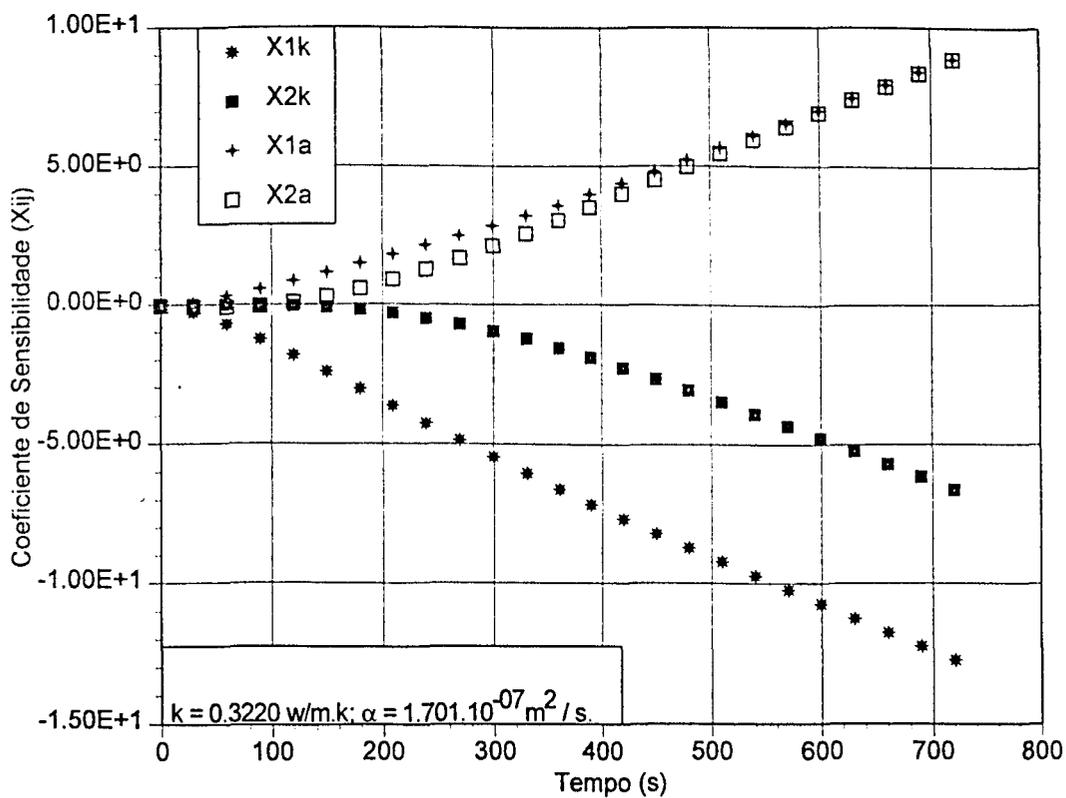


Figura 4.6: Coeficientes de sensibilidade. (Amostra porosa (A)).

Os perfis de fluxo de calor da amostra porosa (C) seca são idênticos aos da Fig. (4.1), (4.2). São mostrados os seus perfis de temperaturas na Fig. (4.7), e seus coeficientes de sensibilidade na Fig. (4.8), com fonte de calor posicionada na superfície superior da amostra porosa.

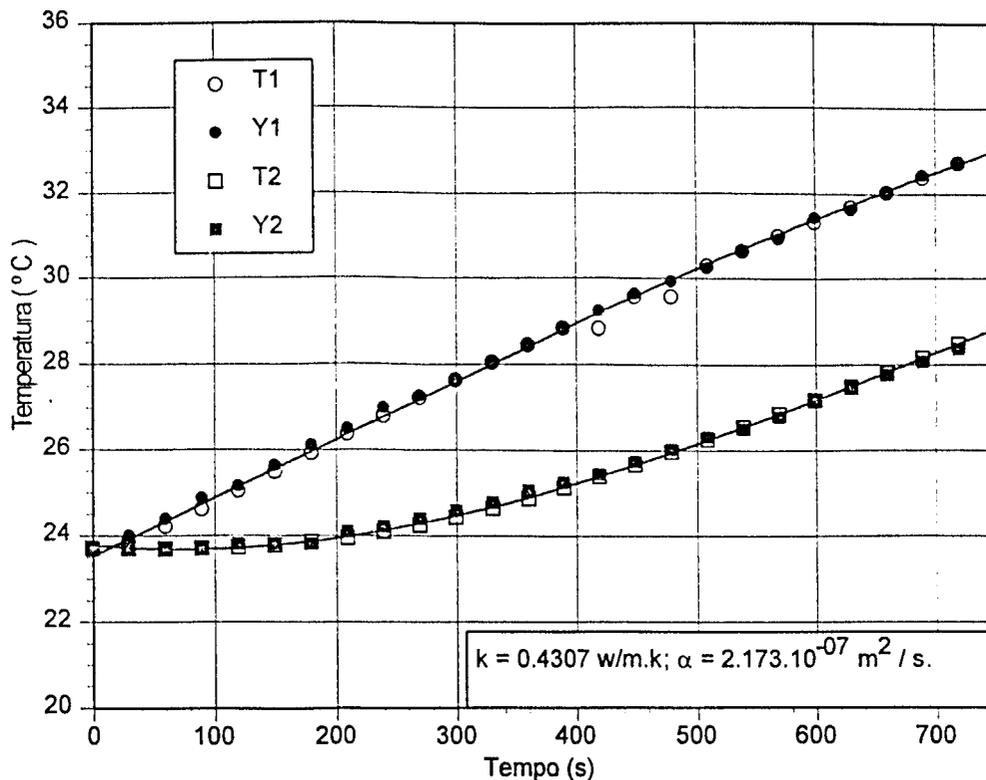


Figura 4.7: Perfis de temperaturas teóricas e experimentais. (Amostra porosa (C)).

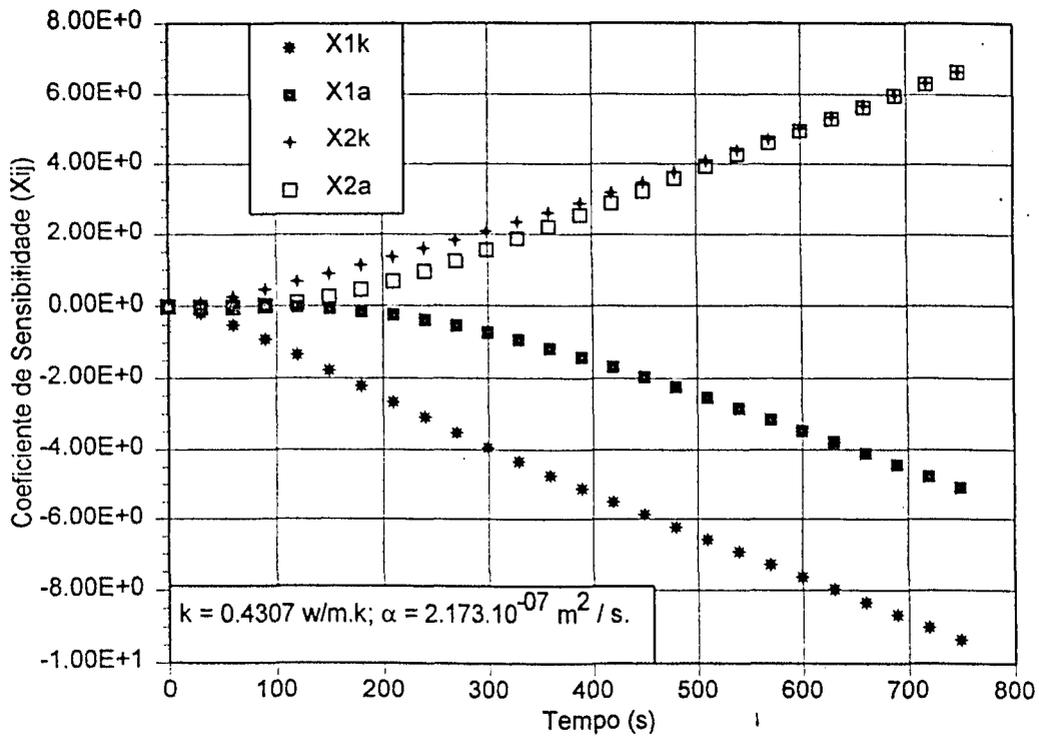


Figura 4.8: Coeficientes de sensibilidade. (Amostra porosa (C)).

Observa-se pelos perfis de temperatura para os três tipos de amostras porosas, que a amostra porosa (B) consta de um termopar que descreve a evolução de temperatura interna à amostra ($x = 1 \times 10^{-02} \text{ m}$). Salienta-se que os resultados obtidos na estimação de parâmetros são os mesmos usando-se ou não a temperatura interna. Portanto, considerando-se o tempo gasto para a inserção do termopar no interior da amostra, juntamente com a precisão de sua localização, sua calibração e aquisição de dados, conclui-se que não é necessário o uso de sensores internos na amostra porosa. Numa segunda etapa de levantamento de dados colocou-se a fonte de calor na superfície inferior da amostra porosa seca, como mostra a Fig. (4.9), tomou-se vários dados

experimentais para confirmar os valores estimados de k e α , para os três tipos de amostras porosas secas. Os resultados obtidos possuíam os mesmos perfis de fluxos de calor, de temperaturas e coeficientes de sensibilidade do que os resultados obtidos com a fonte de calor localizada na superfície superior da amostra porosa. Os valores estimados de k e α encontrados estavam dentro da faixa esperada pela análise de incerteza.

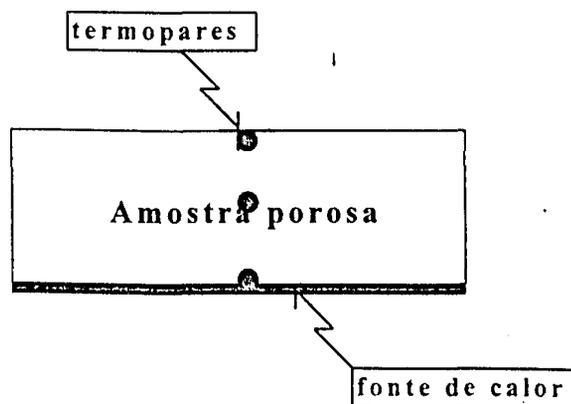


Figura 4.9: Amostra porosa com imposição do fluxo de calor na superfície inferior.

A colocação da fonte de calor na superfície superior ou inferior da amostra seca, não influenciaram na estimação de k e de α , portanto, pode-se afirmar que para estas condições experimentais, para a amostra porosa seca, o processo de transferência de calor ocorre somente por condução.

O cálculo da condutividade térmica efetiva de um meio poroso seco pode ser obtido através de correlações empíricas. Uma

extensa revisão da literatura sobre a condutividade térmica efetiva no início de 1960 é dado por Krupiczka, onde ele apresenta uma correlação empírica para a condutividade térmica efetiva de matrizes formadas por partículas esféricas. [Kaviany, (1991)].

$$\frac{\bar{k}_e}{k_f} = \left(\frac{k_s}{k_f} \right)^{\left[0.280 - 0.757 \times \log \varepsilon - 0.057 \times \log \left(\frac{k_s}{k_f} \right) \right]} \quad (4.1)$$

Onde:

k_f = condutividade térmica do fluido = 0.0263 w/m.k;

k_s = condutividade térmica do sólido = 1.4 w/m.k; W.21167MC1,240LT

k_e = condutividade térmica efetiva do meio poroso;

ε = porosidade do meio poroso.

Comparando os resultados experimentais da amostra seca com a correlação de Krupiczka, tem-se:

Tabela 4.2: Comparação dos valores das condutividades térmicas experimentais e empíricas segundo Krupiczka de cada uma das amostras porosas.

	Amostra porosa A	Amostra porosa B	Amostra porosa C
\bar{k}_e (Krupiczka)	0.2257 w/m.k	0.3494 w/m.k	0.4434 w/m.k
\bar{k}_e (médio) (Experimental)	0.3142 w/m.k	0.3807 w/m.k	0.4125 w/m.k

Note que os valores estimados por Krupiczka estão bem próximos dos experimentais, estando dentro do parâmetro de incerteza, estimado no Capítulo 5.

4.2 - Discussão da influência da saturação no meio poroso

Ao serem realizados os experimentos úmidos conseguiu-se obter saturação de no máximo 30% e apenas para a amostra porosa (B), pois acima desta porcentagem foi difícil reter a umidade no meio poroso, causando o molhamento dos transdutores e termopares da superfície. Este molhamento causa flutuações que interferem nos dados experimentais. Isto ocorre devido, principalmente, ao fato da distribuição do líquido dentro do meio poroso passar do estado pendular para o funicular e da gravidade forçar o líquido a escoar com maior facilidade pelos poros, não permitindo uma distribuição uniforme do mesmo.

A amostra porosa (A) por possuir maior tamanho de poro não reteve a umidade dentro do meio, fazendo o fluido escoar diretamente para o fundo do meio poroso ficando retido na superfície inferior da amostra. A expectativa era que a amostra porosa (C) retesse maior porcentagem de água possível pois

possue a menor porosidade, mas apenas 10% ficou retida em seu interior. A sinterização das esferas de vidro provoca uma união muito grande entre elas, não deixando a água penetrar pelos seus poros ficando retida na superfície causando flutuações nos levantamentos dos fluxos de calor tornando impossível a obtenção dos dados experimentais para esta amostra.

As Figs. (4.10), (4.11) e (4.12) demonstram os perfis de temperatura para um dos dados levantados da amostra porosa (B), com a imposição da fonte de calor na superfície superior da amostra, de saturação igual a 10%, 20%, e 30%, respectivamente. Seus perfis de fluxos de calor e coeficientes de sensibilidade seguem as mesmas linhas do que os apresentados nas Fig. (4.1), (4.2) e (4.4).

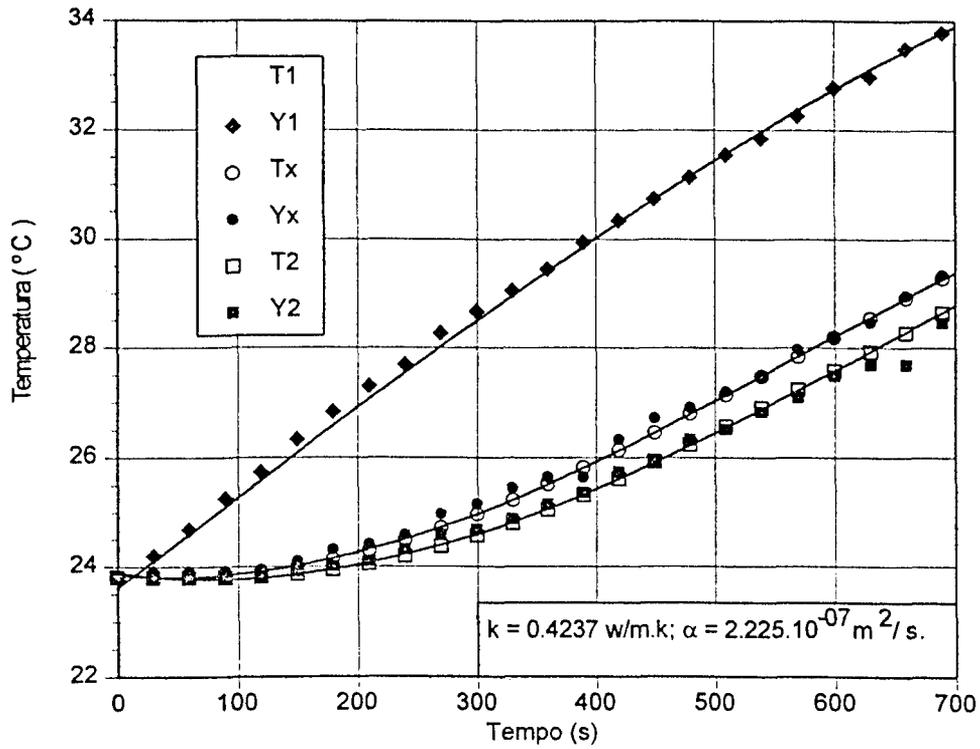


Figura 4.10: Apresentação dos perfis de temperatura para a amostra porosa úmida (B) com 10 % de saturação.

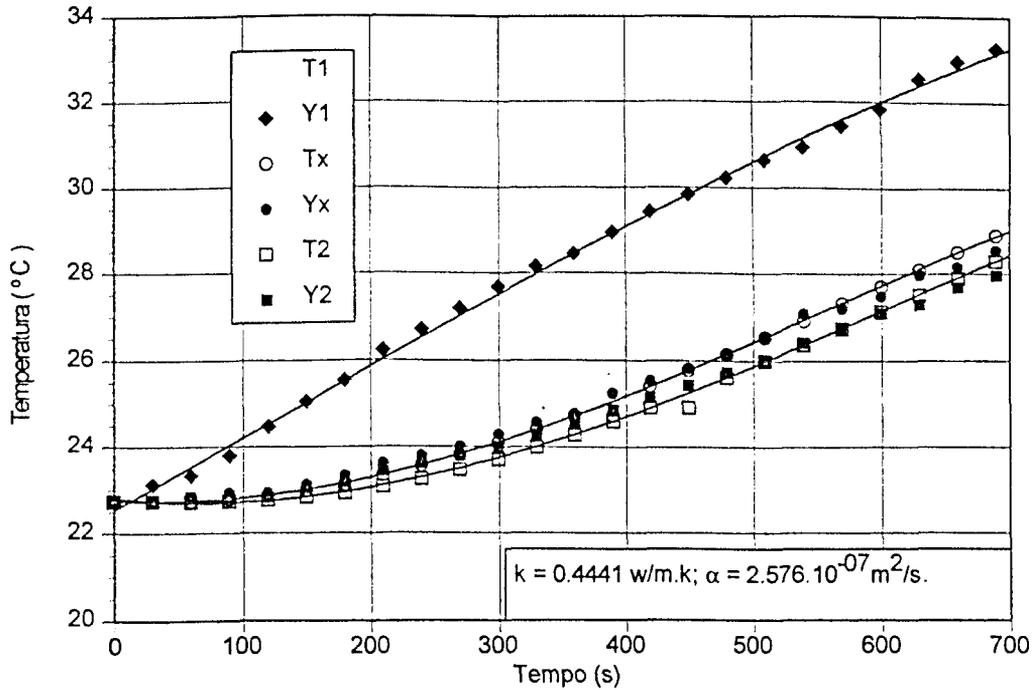


Figura 4.11: Apresentação dos perfis de temperatura para a amostra porosa úmida (B) com 20 % de saturação.

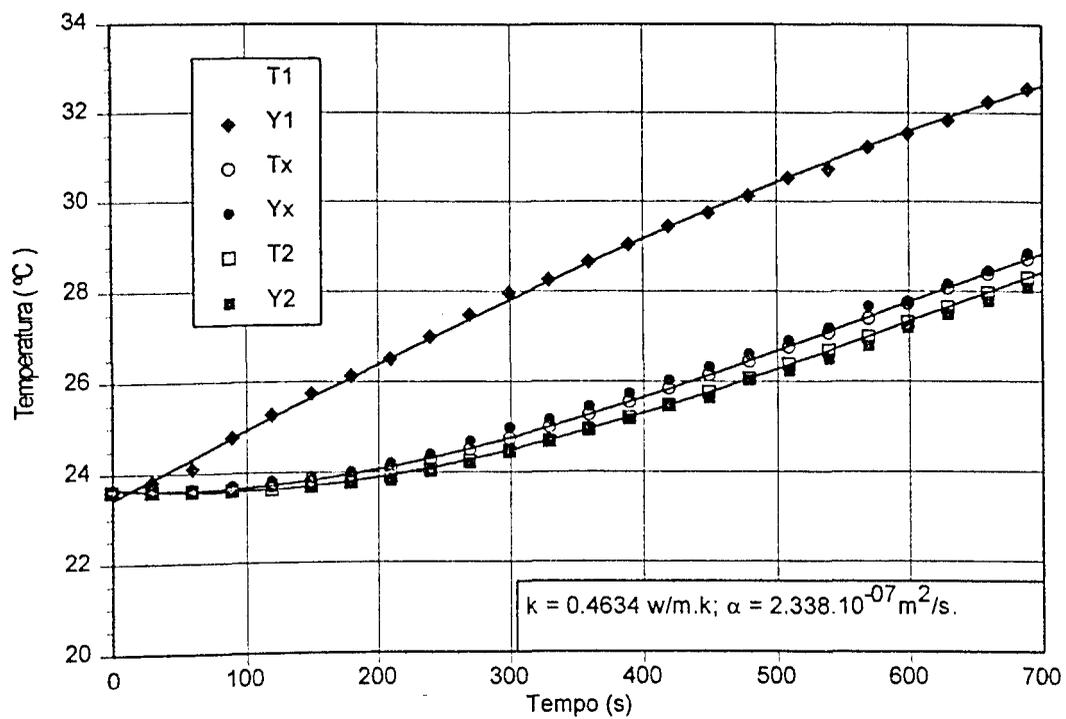


Figura 4.12: Apresentação dos perfis de temperatura para a amostra porosa úmida (B) com 30 % de saturação.

A Fig. (4.13) e a Fig. (4.14) demonstram a saturação de 2.5 % e 10 % para o mesmo dado experimental da amostra porosa (B) com a imposição da fonte de calor na superfície inferior.

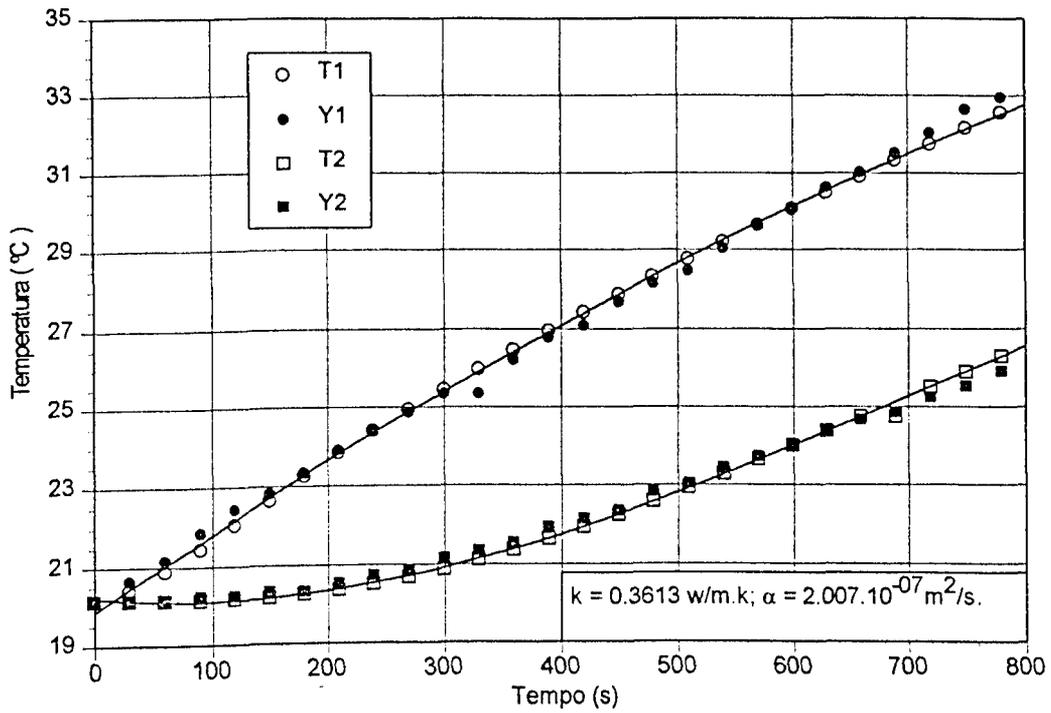


Figura 4.13: Apresentação dos perfis de temperatura para a amostra (B) com 2.5% de saturação.

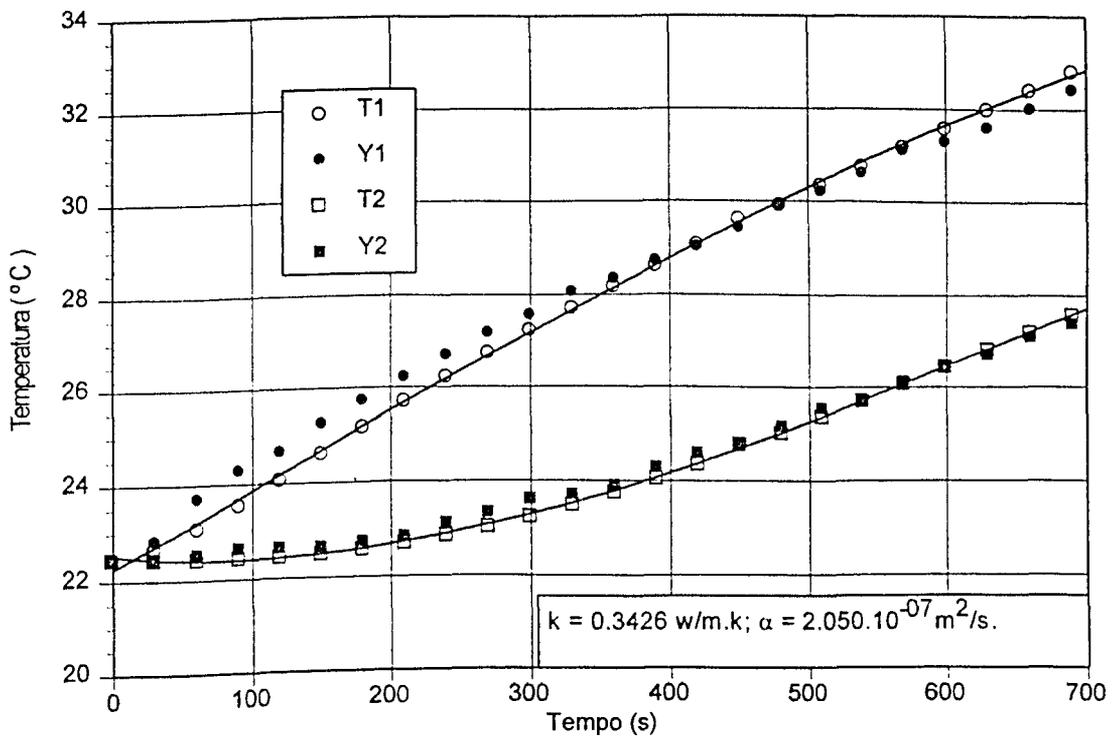


Figura 4.14: Apresentação dos perfis de temperatura para a amostra (B) com 10% de saturação.

Mediu-se os valores de saturação de 2.5%, pois segundo Degiovanni e Moyne (1989), atinge-se um valor máximo de condutividade térmica nesta saturação para temperaturas altas, maiores que 85°C. Entretanto no caso presente não foi observado este fenômeno pois se trabalha com temperaturas baixas.

Pode-se observar na Fig. (4.14) que os perfis de temperaturas não estão bem alinhados como os anteriores. Isto se dá devido a localização da fonte de calor na superfície inferior da amostra, causando molhamento dos transdutores da fonte de calor levando a flutuações nas medidas experimentais, dificultando o levantamento de dados precisos e corretos.

A Fig. (4.15) apresenta os perfis de temperatura para a amostra porosa (C) com 10% de saturação, com a fonte posicionada na superfície superior da amostra. Ao passar para a saturação acima de 10% o líquido fica retido na superfície, não penetrando no meio poroso, molhando os termopares e transdutores de calor fazendo oscilar os valores medidos, sendo portanto, inviável estimar o k e α pelo sistema empregado.

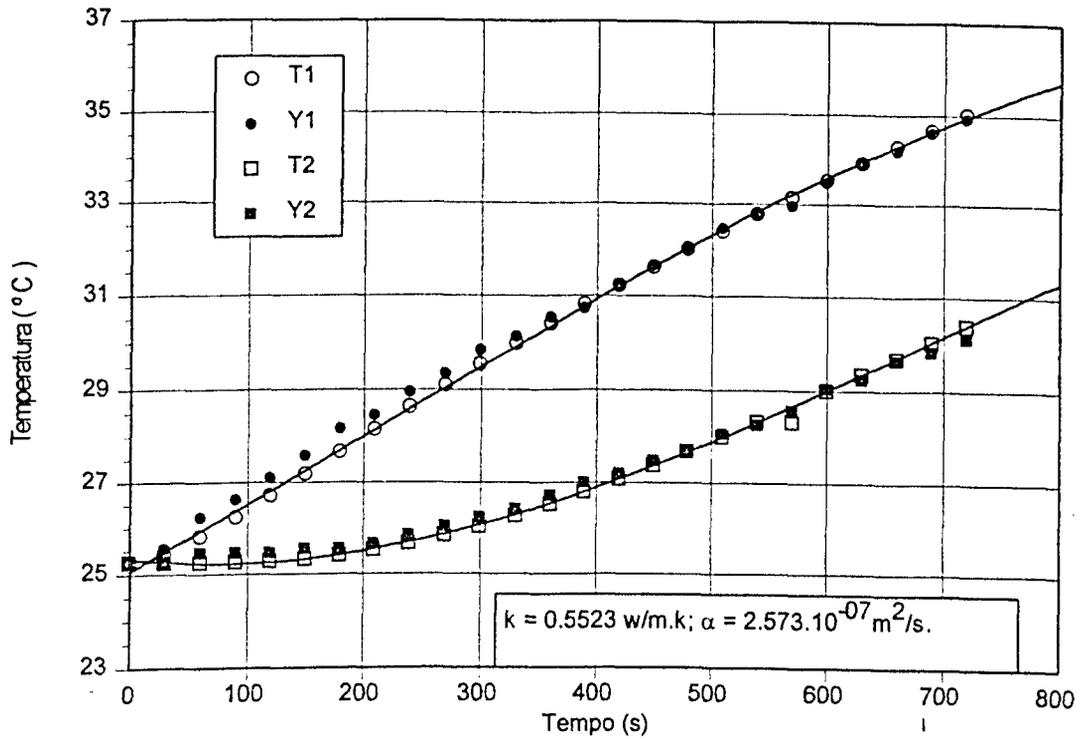


Figura 4.15: Apresentação dos perfis de temperatura para a amostra porosa úmida (C) com 10 % de saturação.

4.3 - Correlação da saturação com a condutividade térmica

A Fig. (4.16) apresenta as condutividades térmicas obtidas em função da saturação do meio para amostras porosas (A), (B) e (C) com imposição da fonte de calor, f.c., na parte superior, e também para a amostra porosa (B) com a fonte de calor, f.c., posicionada na parte inferior.

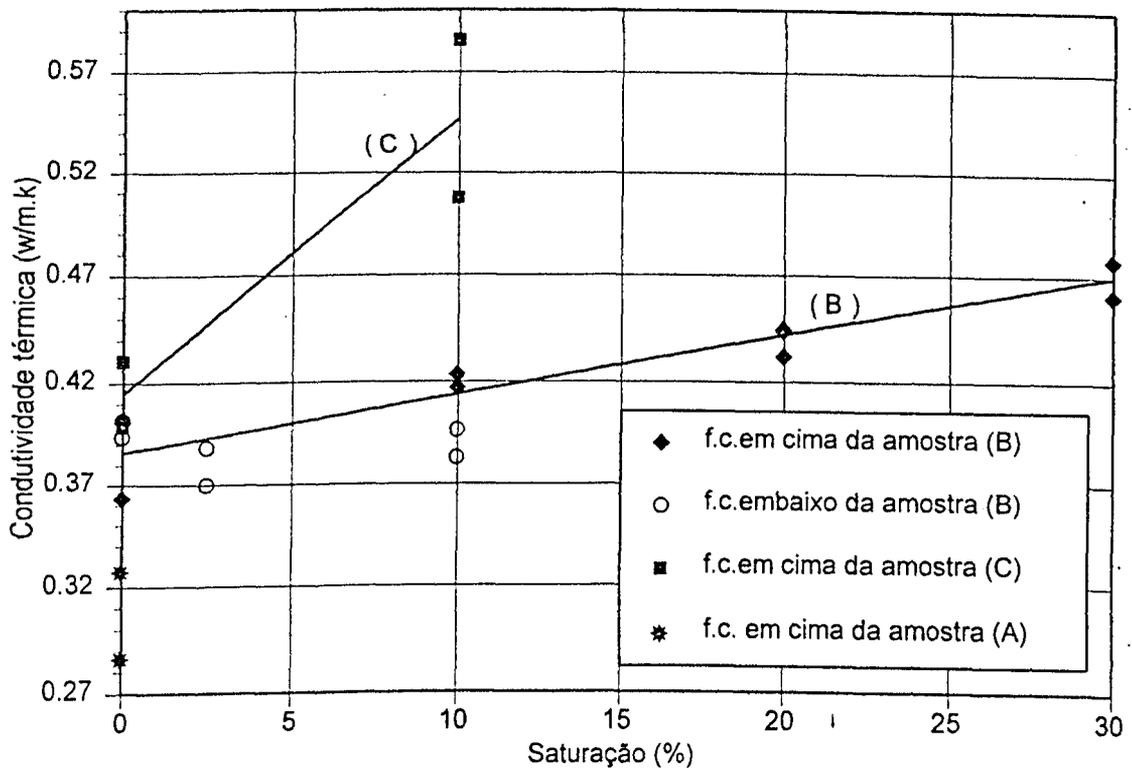


Figura 4.16: Condutividades térmicas em função da saturação para as amostras porosas (A), (B) e (C), com f.c. posicionada na superfície inferior e superior à amostra. T média = 28°C .

Pode-se observar na Fig. (4.16) que a condutividade térmica do meio úmido para a fonte de calor posicionada na parte inferior da amostra (B) é menor do que a condutividade térmica seca, sendo este resultado não esperado, pois a umidade aumenta o valor da condutividade. Uma explicação para este fenômeno já foi comentado anteriormente que é o molhamento dos instrumentos de medidas. Portanto, faz-se necessário um outro tipo de procedimento experimental para se conseguir estimar as propriedades térmicas em um meio poroso úmido com a fonte de

calor posicionada na superfície inferior. Ao observar ainda a Fig. (4.16) pode-se notar que para a amostra porosa (C) úmida ocorre um aumento da condutividade térmica com saturação de 10% e que ela deve crescer a medida que ultrapassa estes 10%. Esta observação deve ser analisada mais profundamente com um número maior de experimentos para a investigação de até que nível de saturação ocorre este aumento da condutividade térmica, pois não foi possível medir os experimentos acima de 10%, devido a problemas já comentados.

Muitos autores comentam que quando se trabalha com temperaturas elevadas a função passa por um máximo devido a migração de fluido e depois decresce perto da saturação de 10%, mas como a temperatura é baixa no presente trabalho, não foi possível observar este fenômeno.

Dentro dos resultados obtidos, com a fonte localizada na superfície superior das amostras porosas (B) e (C) secas e úmidas, pode-se apresentar uma correlação entre a condutividade térmica e a saturação do meio.

Para as amostras porosas (B) e (C) tem-se as seguintes funções lineares da condutividade térmica aparente em função da saturação como sendo:

$$k = k_{\text{seco}} + 2.7989 \times 10^{-03} \times S \quad (\text{B}) \quad (4.2)$$

$$k = k_{\text{seco}} + 1.3200 \times 10^{-02} \times S \quad (\text{C}) \quad (4.3)$$

Onde:

S = saturação do meio poroso;

k = condutividade térmica aparente do meio poroso.

k_{seco} = condutividade térmica aparente do meio seco.

Estas correlações são limitadas para este trabalho experimental. Baseado nestas funções poderia ser descrita uma correlação genérica, onde o coeficiente linear da curva indicaria a amostra porosa seca, ou seja, saturação zero. Mas, para isto se faz necessária uma coletânea maior de dados experimentais dentro dos níveis de porosidades e temperaturas apresentados para se obter uma generalização da propriedade térmica com a saturação para este tipo de amostra porosa.

Salienta-se que as funções (4.2) e (4.3) são limitadas pelo procedimento experimental utilizado, que não permitiu o levantamento de mais dados experimentais relevantes sendo o nível de temperatura em torno de 28° C.

A Fig. (4.17) apresenta as condutividades térmicas em função das porosidades das amostras (A), (B) e (C)

experimentalmente e a correlação de Krupiczka para as amostras porosas secas.

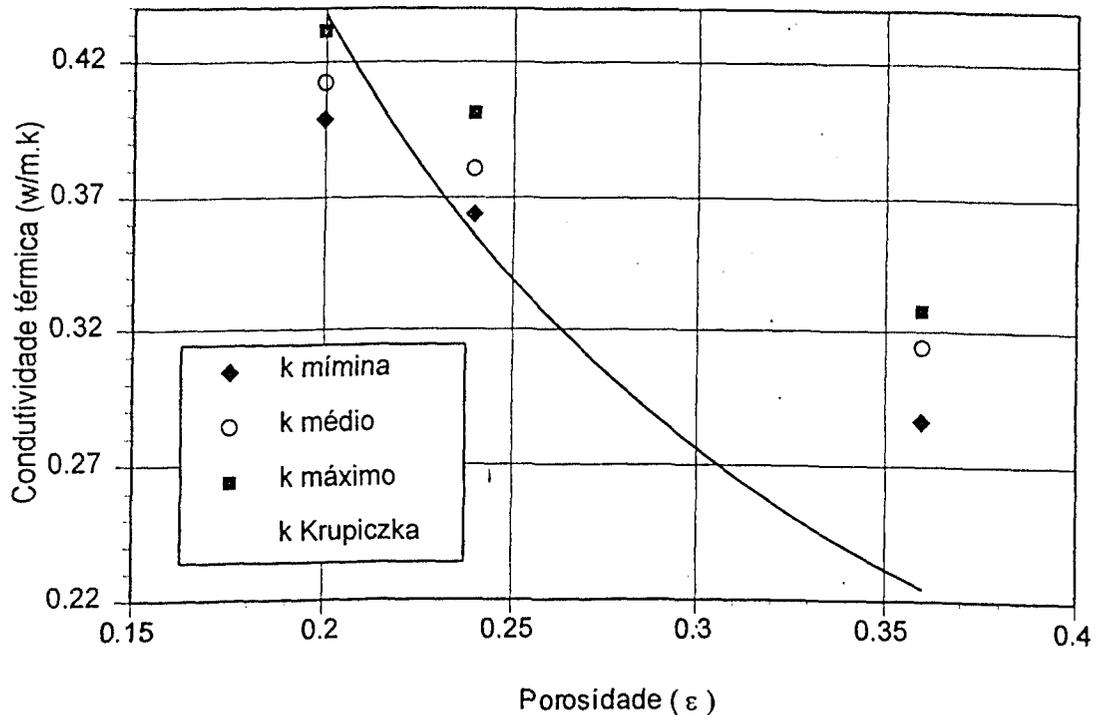


Figura 4.17: Condutividade térmica em função da porosidade do meio.

Observa-se que a medida que aumenta a porosidade da amostra porosa seca a condutividade térmica decresce. Esta correlação foi levantada por Krupiczka, como foi mostrado. Pode-se notar que a função de Krupiczka decai mais rapidamente que os dados experimentais coletados, mas ainda assim, fica dentro dos valores encontrados experimentalmente se contabilizar a análise de incerteza feita no capítulo 5, ficando dentro da imprecisão estimada.

Capítulo 5

5 - ANÁLISE DE INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DE "k" E "α"

5.1 - Introdução à análise de incerteza

O procedimento usado na bancada experimental consiste em medir temperaturas e fluxos de calor nas superfícies da amostra porosa. Estas temperaturas experimentais são, então, comparadas com as temperaturas obtidas do modelo teórico. As temperaturas experimentais são coletadas no intervalo de 30 segundos até que o fluxo de calor da superfície atinja o valor máximo e se estabilize (aproximadamente 720s). Os erros experimentais que ocorrem são decorrentes desse processo de medição.

Sabe-se que a obtenção das propriedades térmicas, k e α , é resultado destas medições e, portanto, é comum apresentarem valores inexatos. Todavia, a importância dos erros vindo do processo experimental deve ser analisada com cuidado para sua relevância na concepção final do estudo.

Dentro dos possíveis erros do método utilizado estão:

- a incerteza na restrição do modelo como fluxo de calor unidimensional;
- incerteza no contato térmico entre os sensores do aparato experimental;
- incerteza de medição nas tomadas dos dados experimentais devido ao instrumento de medição utilizado;
- incerteza de medição de temperaturas e fluxos de calor devido à calibração dos sensores e do sistema de medição;
- incerteza de medição da espessura da amostra porosa.

Dentro da incerteza de restrição unidimensional foi possível considerá-la mínima em relação às outras incertezas devido a experimentos feitos durante o procedimento inicial do presente estudo. Colocou-se ao longo de toda a superfície da amostra porosa vários termopares para o levantamento dos perfis de temperatura. Notou-se então, que as temperaturas centrais se diferenciavam muito pouco das temperaturas das bordas, sendo portanto satisfatória a hipótese da inexistência de fuga de fluxo de calor pelas laterais da amostra porosa. Este fato garante a hipótese de fluxo de calor unidimensional na amostra porosa.

A incerteza no contato térmico dos sensores com a amostra porosa foi minimizada com a presença contínua de placas

06028/95

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO NORTE
REGISTRO

de silicone e pesos adicionais sobre a amostra para não deixar ocorrer a formação de bolhas de ar entre a amostra porosa e os sensores. Observa-se que na presença de bolhas de ar os valores das propriedades termofísicas ficam menores que as reais devido a resistência de contato, fazendo aparecer flutuações entre as temperaturas teóricas e experimentais.

Além disso, uma análise das hipóteses de fluxo de calor unidimensional e contato térmico perfeito entre os sensores e uma amostra foi feita por Guimarães (1993a), através de uma simulação numérica. Os resultados permitem considerar seguro o uso das duas hipóteses, sendo seus efeitos desprezados dentro do modelo teórico utilizado e das condições experimentais proposto naquele trabalho. A simulação foi baseada em perdas de calor pelas laterais e influência dos transdutores e da lâmina de borracha de silicone usado para um melhor contato térmico.

Neste trabalho, o procedimento experimental consiste na tomada de temperaturas nas superfícies da amostra e na parte interna da mesma a cada 30 segundos. As temperaturas são lidas por um termômetro digital com resolução de décimos de graus e os valores do fluxo de calor por um microvoltímetro digital com resolução de $10 \mu\text{v}$.

Após a aquisição das medidas, os valores das temperaturas passam por uma curva polinomial de ajuste feita por um

termômetro padrão de resolução de dois décimos de graus mostrada na equação:

$$T = -2.96154 \times 10^1 + 5.38813 \times T_x - 2.51202 \times 10^{-1} \times T_x^2 + 6.81456 \times 10^{-3} \times T_x^3 + \\ - 8.77699 \times 10^{-5} \times T_x^4 + 4.32318 \times 10^{-7} \times T_x^5 \quad (5.1)$$

As leituras do fluxo de calor passam por um ajuste para mudança de μv (microvolts) para watts/m^2 . O transdutor que acompanha a fonte de calor é denominado F_1 e o da superfície oposta F_2 . As curvas de calibração, segundo Guimarães (1993b), de F_1 e F_2 são respectivamente:

$$q_1 = 1.385446 + 0.158116 \times F_1 \quad (5.2)$$

$$q_2 = 2.512502 + 0.180419 \times F_2 \quad (5.3)$$

A análise de incerteza proposta neste trabalho utiliza o princípio dos mínimos quadrados. Este princípio consiste em determinar qual o melhor ou mais provável valor de medida quantificada que minimiza a soma dos quadrados dos erros. Assim, os erros acidentais são quantidades reais e seus quadrados são quantidades positivas, fazendo-se necessário que a soma destas quantidades positivas sejam tão pequenas quanto possível.

Sabe-se que as temperaturas mínimas e máximas medidas não ultrapassam 20°C e 38°C respectivamente, e que o fluxo de calor está numa faixa de 0 μv a 1700 μv . Portanto, fazendo uma análise de incerteza nas temperaturas medidas, nos fluxos de calor obtidos e na espessura da amostra, vem:

$$(\text{Incerteza Experimento})^2 = (\text{Incerteza Instrumento})^2 + (\text{Incerteza Calibração})^2$$

$$I_{\text{exp}} = \sqrt{I_{\text{inst}}^2 + I_{\text{cal}}^2} \quad (5.4)$$

5.2 - Análise de incerteza das medidas do fluxo de calor

A incerteza dos fluxos de calor obtidos é devida ao microvoltímetro digital que possui incerteza de 10 μv e à calibração dos dois transdutores que, segundo Guimarães (1993), tem incerteza de 2,05%, portanto, para a medida média de 850 μv tem-se:

$$I_{\text{inst}} = \frac{860 - 850}{850} = 1.18\% \quad (5.5)$$

E utilizando a Eq. (5.4) vem:

$$I_{exp} = \sqrt{(1.18)^2 + (2.05)^2} \quad (5.6)$$

$$I_{exp} = 2.35 \%$$

Usando um dado de medição experimental como referência, pode-se obter a incerteza em cada variável do valor estimado de k e α .

Como referência utiliza-se a amostra porosa (B), cujos valores estimados dos parâmetros são:

- $k = 0,4014 \text{ w/m.k}$ e $\alpha = 2,354 \times 10^{-03} \text{ m}^2/\text{s}$.

A partir da evolução dos fluxos de calor com suas respectivas incertezas, estimou-se os novos valores dos parâmetros, ou seja:

- $k = 0,4670 \text{ w/m.k}$ e $\alpha = 2360 \times 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pode-se, nesse caso, concluir que:

1. Em relação a k , comparando-se os dois valores, o de referência e o da incerteza, obtém-se uma incerteza de 16 %.

2. Em relação a α , comparando-se os dois valores, o de referência e o da incerteza, obtém-se uma incerteza de 0,25 %.

Portanto, a incerteza de medição entre os fluxos de calor medidos está em torno de 16 %.

5.3 - Análise de incerteza das medidas de temperaturas

A incerteza do termopar é de dois décimos de graus e a incerteza da calibração é de quatro décimos de grau, portanto, a incerteza do experimento em relação à temperatura mínima de 20°C é de:

$$I_{\text{exp}} = \sqrt{(0.2)^2 + (0.4)^2} \quad (5.7)$$

$$I_{\text{exp}} = 0.45 \text{ ou } 2.25\%$$

Em relação à temperatura máxima de 38° C é de:

$$I_{\text{exp}} = 1.18 \%$$

Considerando os mesmos fluxos de calor da amostra porosa de referência e modificando as temperaturas experimentais com suas respectivas incertezas obteve-se os seguintes valores dos parâmetros estimados:

- $k = 0,3926 \text{ w/m.k}$ e $\alpha = 2,347 \times 10^{-03} \text{ m}^2/\text{s}$.

Assim, conclui-se que:

1. Em relação a k , comparando o valor de referência com o valor da incerteza obtém-se 2,19 %.
2. Em relação a α , comparando o valor de referência a incerteza obtém-se 0,3%.

Portanto, a incerteza de medição entre as temperaturas medidas está em torno de 2,19 %.

5.4- Análise de incerteza da medida da espessura da amostra

porosa

Cita-se ainda a incerteza associada à determinação efetiva da espessura da amostra porosa, cuja superfície não é uniforme. A medida da espessura da amostra foi determinada por um micrômetro com resolução de 2 μm por todo o centro da amostra porosa. Fazendo-se uma média dos seus valores, para a amostra porosa (B) de referência, a espessura foi calculada em $13,85 \times 10^{-03}$ m.

Tabela 5.1: Amostragem das espessuras medidas da amostra porosa B de $L = 13,85 \times 10^{-03}$ m.

14.0188×10^{-03} m	14.0632×10^{-03} m	14.0543×10^{-03} m
14.1918×10^{-03} m	13.6026×10^{-03} m	13.8636×10^{-03} m
13.2044×10^{-03} m	13.4860×10^{-03} m	13.8844×10^{-03} m
13.7262×10^{-03} m	13.4048×10^{-03} m	<u>14.6874×10^{-03} m</u>

Na tabela (5.1), o número em destaque é o valor mínimo medido e o número sublinhado é o valor máximo medido.

Desprezando-se a incerteza do instrumento, 0,01%, os valores das incertezas das medidas entre os extremos são:

- Para o valor mínimo:

$$I_{\text{exp}} = I_{\text{medido}} = \frac{13,85 \times 10^{-03} - 13,6026 \times 10^{-03}}{13,85 \times 10^{-03}} \quad (5.8)$$

$$I_{\text{exp}} = I_{\text{medido}} = 0,018 \text{ ou } 1,8\%$$

- Para o valor máximo:

$$I_{\text{exp}} = I_{\text{medido}} = \frac{14,6874 \times 10^{-03} - 13,85 \times 10^{-03}}{13,85 \times 10^{-03}} \quad (5.9)$$

$$I_{\text{exp}} = I_{\text{medido}} = 0,06 \text{ ou } 6\%$$

Portanto, em relação a espessura da amostra porosa a incerteza é de no máximo 6%.

Utilizando as evoluções de fluxo de calor e temperaturas experimentais da amostra de referência e, considerando a espessura, $L = 14,68 \times 10^{-03}$ m, estima-se novos valores dos parâmetros, ou seja:

- $k = 0,4198$ w/m.k e $\alpha = 2,579 \times 10^{-03}$ m²/s.

Conclui-se assim, que:

1. Em relação a k , comparando o valor de referência com o valor estimado considerando a incerteza, tem-se 4,58 %.
2. Em relação a α , comparando o valor de referência com o valor estimado considerando a incerteza, obtém-se 9,88 %.

5.4 - Comparação dos parâmetros

Utilizando a soma quadráticas das porcentagens das incertezas dos valores de k e α tem-se:

Para o valor da condutividade térmica, k , a incerteza é:

$$I_k = \sqrt{(16)^2 + (4.58)^2 + (2.19)^2} \quad (5.10)$$

$$I_k = 16.79\%$$

Para o valor da difusividade térmica, α , a incerteza é:

$$I_\alpha = \sqrt{(0.5)^2 + (9.88)^2} \quad (5.11)$$

$$I_\alpha = 9.89\%$$

Capítulo 6

6 - CONCLUSÃO

Com o método de estimação de parâmetros no domínio do tempo alcançou-se os objetivos propostos permitindo determinar satisfatoriamente a condutividade térmica de um meio poroso seco e úmido. Este método é confiável, simples e barato. Obtém-se a partir do modelo teórico as temperaturas teóricas que serão comparadas com as temperaturas experimentais obtidas do aparato experimental com precisão.

A determinação do fluxo de calor por efeito Joule através de uma folha de resistência mostrou-se adequada e suficiente para a obtenção dos fluxos de calor. Este sistema é um aspecto importante para se baratear o custo da bancada experimental. O uso de transdutores de calor torna possível a implementação do método pela resposta rápida e alta sensibilidade.

Para as medidas efetuadas o transporte de calor por convecção pode ser desprezado.

A saturação máxima conseguida para a amostra porosa (B) está dentro dos limites observados em publicações para meios

porosos de esferas de vidro. Se faz necessário modificar o aparato experimental para se obter melhores medidas de fluxo de calor com a fonte de calor posicionada na parte inferior da mesma e também para analisar as amostras com maior teor de umidade.

O objetivo do trabalho foi alcançado com o levantamento da correlação da condutividade térmica efetiva e a saturação do meio poroso. Neste sentido, pode-se afirmar que o presente trabalho contribui para melhorar o desempenho do levantamento de dados experimentais das propriedades termofísicas em meios porosos juntamente com suas variações dentro de um meio poroso saturado. Pode-se comentar também que as hipóteses impostas neste estudo simplificam a resolução do problema e facilitam a compreensão do mesmo. Os problemas inerentes a posição dos transdutores e termopares na amostra porosa devido à resistência de contato que interferem nos valores estimados, podem e devem ser minimizados.

Sugestões de trabalhos futuros:

- Desenvolver uma bancada experimental que permita obter temperaturas mais elevadas, medidas com a fonte de calor na parte inferior, sem a interferência da umidade no seu local.
- Tentar modificar o meio poroso para reter maior quantidade de umidade para se ter sucesso nas medidas

experimentais usando a mesma bancada experimental e aumentando a temperatura de trabalho.

- Medir as propriedades termofísicas através de temperaturas altas no meio saturado para acoplar o efeito convectivo nos valores estimados da condutividade térmica e difusividade térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARPACI, V.S. (1966), Conduction Heat Transfer, Addison - Wesley Publishing Company, 1^ª ed.
2. AZIZI, J.C. ,BATSALE, C. MOYNE, A. DEGIOVANNI (1989), Conductivite Thermique des milieux poreux humides. Analyse theorique et mesure. L.E.M.T.A.,Ecole des Mines, Parc de Saurupt, Nancy - France.
3. BECK, J. V. (1964), The optimum analytical design of transient experiments for simultaneous determination of thermal conductivity and specific heat, Ph.D. Thesys, Michigan State University.
4. BECK, J. V. & ARNOLD, K. J. (1977), Parameter Estimation in Engineering and Science. Wiley, New York .
5. BECK, J.V., BLACKWELL, B. & St. CLAIR, C.R. (1985), Inverse Heat Conduction. Wiley Interscience Publication - NY.
6. BLACKWELL, J. H. (1954), A transiente-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk, Journal of Applied Physics, vol 25, pp 137-140.
7. CARSLAW, H. S. & JAEGER, J. C. (1959), Conduction of heat in solid, Oxford University Press, New York.

8. DE VRIES, D. A. (1954), Thermal Properties of Soils. Laboratory of Physics and Meteorology of the Agricultural University Wageningen. The Netherlands, chapter 7.
9. DE VRIES, D. A. (1958), Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. Transactions American Geophysical Union, 1958. v.39, p.909 - 916.
10. DE VRIES, D. A. (1987), The theory of heat moisture transfer in porous media revisited. Camberra, Pergamon Journal. V.30, p.1345-1350.
11. FRANCL, J. & KINGERY, W.D. (1954), Thermal conductivity: IX, Experimental investigation of effect of porosity on thermal conductivity.
12. GUIMARÃES, G. (1993a), Estimação de parâmetros no domínio da frequência para a determinação simultânea da condutividade e difusividade térmica. Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis-S.C.
13. GUIMARÃES, G. (1993b), Calibração de sensores de fluxo de calor e temperatura para medição de propriedades termofísicas. Relatório interno da UFSC, Florianópolis - S.C.
14. GUIMARÃES & G. PHILIPPI, P. C. (1994), Uma análise e sensibilidade na determinação de propriedades térmicas através da técnica de estimação de parâmetros. V Encit, dezembro de 1994, p. 391-394, São Paulo-S.P..
15. KAVIANY, M. (1991), Principles of Heat Transfer in Porous Media. Michigan, Springer-Verlog New York Inc. 623 p..

16. LECLERQ, D. & THERY, P. (1983), Apparatus for simultaneous temperature and heat-flow measurements under transient conditions, Rev. Sci. Instrum., v. 54, p. 374-380.
17. LUIKOV, A.V. (1968), Analytical heat diffusion theory. Academic Press, New York.
18. LUIKOV, A.V. (1980), Heat and mass transfer. Trad. T. Kortneva, Moscou, Mir Publishers. 623p.
19. MOYNE, C. & DEGIOVANNI, A. (1989), Prise de moyenne et conductivite thermique des milieux poreux humides. Société Française des Thermiciens. Journee d'Estude sur les transferts thermiques dans les milieux poreux.
20. PARKER, W. J., JENKINS, R. J., BUTLER, C. P. & ABBOTT, G. L., Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity, Journal of Applied Physics, vol 32, pp 1679-1684.
21. PHILIP, J. R. & DE VRIES, D. A. (1957), Moisture movement in porous material under temperature gradients. Transactions American Geophysical Union. V.38, p. 222 - 232.
22. SASAKI, A., AIDA, S. & FUKUDA, H. (1985), A study on the thermophysical properties of a soils. International Journal Heat Mass Transfer. V.109, p. 232 - 237.
23. SILVEIRA NETO, A. (1985), Soluções exatas para o problema de transporte simultâneo de calor e massa em elementos porosos unidimensionais. Dissertação de mestrado. UFSC, Florianópolis - S.C..

24. SOUZA, H.A. Estudo dos processos de fixação e transferência isotérmica de umidade em meios porosos heterogêneos. Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis - S.C..
25. SPIEGEL, M.R. (1992), "Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática", Schaum McGraw-Hill, 2[@] ed.. São Paulo.
26. TINKER, J.A. (1973), Modelling the thermal conductivity of multiphase materials containg moisture. Departament of Civil Engineering, University of Leeds - England.
27. TREVISAN, O. V., MOHANY, S. & MILLER, M. A. (1993), Trasiient method for measuring thermal properties of saturated porous media. International Journal Heat Mass Transfer. Campinas- S.P. - Brasil. V.36, p.2565-2573.
28. VAFAI, K. & TIEN, C. L. (1980), Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media. International Journal Heat Mass Transfer, Califórnia. V.24, p.197-203.
29. WOODSIDE, W. & MESSMER, J. H. (1961), Thermal conductivity of porous media, I. Unconsolidated Sands. Journal of Aplied Physics, Pittsburgh - Pennsylvania. V. 32, p. 1688 - 1699.