

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola
Tecnologia Pós-Colheita**

Determinação de Condutividade e Difusividade Térmica de Grãos de Soja

**Ana Paula Ito
Engenheira Agrícola**

Orientador: Prof.Dr. Kil Jin Park

Co-orientadora: Profa. Dra. Mariangela Amendola

**Campinas
Fevereiro de 2003**

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola
Tecnologia Pós-Colheita**

Determinação de Condutividade e Difusividade Térmica de Grãos de Soja

**Ana Paula Ito
Engenheira Agrícola**

Orientador: Prof.Dr. Kil Jin Park

Co-orientadora: Profa. Dra. Mariangela Amendola

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, em cumprimento parcial aos requisitos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Tecnologia Pós-Colheita.

**Campinas
Fevereiro de 2003**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

It6d Ito, Ana Paula
Determinação de condutividade e difusividade
térmica de grãos de soja / Ana Paula Ito.--
Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientadores: Kil Jin Park e Mariangela
Amendola.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Soja – Propriedades térmicas. 2. Simulação
(Computadores). 3. Difusividade térmica. I. Park,
Kil Jin. II. Amendola, Mariângela. III. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. IV. Título.

DEDICO

***Aos meus pais Mário e Thereza,
queridos e sempre presentes.
Às minhas irmãs Vanessa e Danielle,
companheiras e amigas.
Ao Marcelo,
pelo amor e pelo carinho.***

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Kil Jin Park pela orientação, paciência, e principalmente amizade que tornaram possíveis a realização deste trabalho.

À profa. Mariangela pela co-orientação, dedicação e amizade.

Ao Brod, Juliana, Rafael e Ricardo pela amizade e contribuição na realização deste trabalho.

Aos amigos, Rogério e Jean, pela amizade e solidariedade nos bons e maus momentos.

À Marlies e ao Léo pelo apoio e amizade durante esses anos.

Ao Walterley, Marcelo, Anderson e a todos os meus queridos amigos.

À minha querida família, primos, primas, tios e tias, avôs e avós.

À banca examinadora pela contribuição através das sugestões e correções apresentadas ao trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa e a FAEP-UNICAMP pelo financiamento do equipamento.

Aos professores, funcionários e colegas da Feagri.

À Feagri.

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
I INTRODUÇÃO	1
II OBJETIVO	2
III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Condutividade térmica	3
3.2 Difusividade térmica	5
3.3 Estudo de caso: regime permanente	8
3.4 Estudo de caso: regime transiente	10
3.5 Estudo de caso: equilíbrio dinâmico	12
3.6 Métodos numéricos	16
3.7 Propriedades físicas	18
IV MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Descrição do equipamento	20
4.2 Material biológico	21
4.3 Caracterização física do material biológico	22
4.3.1 Determinação do conteúdo de umidade	22
4.3.2 Determinação da densidade real	23
4.3.3 Determinação da densidade aparente	23
4.4 Obtenção dos dados experimentais	24
4.5 Determinação da condutividade térmica: Regime permanente	25
4.6 Determinação da condutividade térmica: Regime transiente	25
4.6.1 Modelo matemático	26
4.6.2 Método numérico	27
4.6.2.1 Estudo da influência da malha	29
4.6.3 Algoritmo	29
4.6.4 Análise dos resultados	31
V RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1 Caracterização física	32
5.1.1 Conteúdo de umidade	32
5.1.2 Densidade real	32
5.1.3 Densidade aparente	33
5.2 Regime permanente	34
5.2.1 Condutividade térmica	35
5.2.1.1 Condutividade térmica média	38

5.2.2	Difusividade térmica	40
5.2.2.1	Difusividade térmica média	40
5.3	Método numérico	42
5.3.1	Estudo da influência da malha	42
5.3.2	Determinação da condutividade térmica	44
5.3.2.1	Conjunto de dados: aquecimento= 0V; altura= H5	44
5.3.2.1.1	Termopar 1	45
5.3.2.1.2	Termopar 2	47
5.3.2.1.3	Termopar 3	50
5.3.2.1.4	Termopar 4	52
5.3.2.1.5	Junção de todas as curvas experimentais e numéricas	55
5.3.2.2	Conjunto de dados: aquecimento= 0V; altura= H6	56
5.3.2.3	Conjunto de dados: aquecimento= 0V; altura= H7	57
5.3.2.4	Conjunto de dados: aquecimento= 0,25V; altura= H5	59
5.3.2.5	Conjunto de dados: aquecimento= 0,25V; altura= H6	60
5.3.2.6	Conjunto de dados: aquecimento= 0,25V; altura= H7	62
5.3.2.7	Conjunto de dados: aquecimento= 0,30V; altura= H5	63
5.3.2.8	Conjunto de dados: aquecimento= 0,30V; altura= H6	64
5.3.2.9	Conjunto de dados: aquecimento= 0,30V; altura= H7	66
5.3.2.10	Conjunto de dados: aquecimento= 0,40V; altura= H5	67
5.3.2.11	Conjunto de dados: aquecimento= 0,40V; altura= H6	68
5.3.2.12	Conjunto de dados: aquecimento= 0,40V; altura= H7	70
5.3.2.13	Conjunto de dados: aquecimento= 0,70V; altura= H5	71
5.3.2.14	Conjunto de dados: aquecimento= 0,70V; altura= H6	73
5.3.2.15	Conjunto de dados: aquecimento= 0,70V; altura= H7	74
5.3.2.16	Condutividade térmica média	76
5.3.2.17	Difusividade térmica média	79
VI	CONCLUSÕES	82
VII	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICES		89
	Apêndice 1: Esquema do equipamento construído:	90
	Apêndice 2: Dados experimentais de temperatura	95

NOMENCLATURA

A	Área de transferência de calor	m ²
Cp	Capacidade calorífica	J/kg°C
D	Distância entre R1 e R2	m
Er	Erro relativo	%
fo	Número de Fourier	
H	Altura do cilindro	m
H	Altura de colocação dos termopares	m
H5	Altura de colocação dos termopares a 5cm da tampa	
H6	Altura de colocação dos termopares a 6cm da tampa	
H7	Altura de colocação dos termopares a 7cm da tampa	
i	Amperagem	A
k	Condutividade térmica	W/m°C
L	Comprimento da amostra	m
m	Número de divisões no espaço	
M _{amostra}	Massa da amostra	kg
M.D.F	Método de diferenças finitas	
M.E.F.	Método de elementos finitos	
p	Número de divisões no tempo	
Peso final	Peso final da amostra	kg
Peso inicial	Peso inicial da amostra	kg
Q	Transferência de calor	W
qf	Fluxo de calor	W/m ²
r	Raio	m
R	Espaço de confinamento da amostra	m
R1	Raio interno	m
R2	Raio externo	m
R3	Raio do cilindro isolante	m

RE	Resíduo	°C
ro	Densidade	kg/m ³
S1	Cilindro interno (r=0,013m)	
S2	Cilindro externo(r=0,049m)	
S3	Cilindro isolante (r=0,062m)	
t	Tempo	S
T	Temperatura	°C
T ₁	Temperatura em R1	°C
T ₂	Temperatura em R2	°C
T _∞	Temperatura no ambiente	°C
TE	Dados experimentais de temperatura	°C
TER1	Posição do termopar 1 (0,013m)	
TER2	Posição do termopar 2 (0,022m)	
TER3	Posição do termopar 3 (0,031m)	
TER4	Posição do termopar 4 (0,049m)	
U	Voltagem	V
U _{bs}	Umidade em base seca	%
U _{bu}	Umidade em base úmida	%
V _{final}	Volume do fluido picnométrico mais amostra	M ³
V _{inicial}	Volume inicial do fluido picnométrico	M ³
Vol.recip.	Volume do recipiente	M ³
X _a	Conteúdo de umidade do material	%
X _c	Teor de carboidrato do material	%
X _g	Teor de gordura do material	%
X _p	Teor de proteína do material	%
z	Direção axial	

LETRAS GREGAS

α	Difusividade térmica	m^2/s
ϕ	Direção angular	
$\Delta\varphi_1$ (figura1)	Diferença de temperatura entre R1 e R2 no tempo 1	
$\Delta\varphi_2$ (figura1)	Diferença de temperatura entre R1 e R2 no tempo 2	
θ	Diferença de temperatura	$^{\circ}C$
ρ	Densidade	kg/m^3

SUBSCRITOS

1	Tempo 1
2	Tempo 2
ap	Aparente
j	Índice relacionado ao espaço
real	Real
w	água

SOBRESCRITOS

i	Índice relacionado ao tempo
---	-----------------------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do equipamento para o método do equilíbrio dinâmico.	15
Figura 2: Corte do equipamento construído	20
Figura 3: Aparelho de determinação de densidade aparente	24
Figura 4: Curvas de temperatura em relação ao tempo variando-se m	43
Figura 5: Resíduo gerado em função da condutividade térmica de TER1 em H5 sem aquecimento	46
Figura 6: Dados experimentais e numéricos de TER1 em H5 sem aquecimento	47
Figura 7: Resíduo gerado em relação a condutividade térmica de TER2 em H5 sem aquecimento.	49
Figura 8: Dados experimentais e numéricos de TER2 em H5 sem aquecimento	49
Figura 9: Resíduo gerado em relação a condutividade térmica de TER3 em H5 sem aquecimento	51
Figura 10: Dados experimentais e numéricos de TER3 em H5 sem aquecimento	52
Figura 11: Resíduo gerado em relação a condutividade térmica de TER4 em H5 sem aquecimento	54
Figura 12: Dados experimentais e numéricos de TER4 em H5 sem aquecimento	54
Figura 13: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 sem aquecimento	55
Figura 14: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, sem aquecimento	56
Figura 15: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, sem aquecimento	58
Figura 16: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,25V de aquecimento	59
Figura 17: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,25V de aquecimento	61
Figura 18: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,25V de aquecimento	62
Figura 19: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,30V de aquecimento	63
Figura 20: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,30V de aquecimento	65
Figura 21: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,30V de aquecimento	66
Figura 22: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,40V de aquecimento	67
Figura 23: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,40V de aquecimento	69
Figura 24: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,40V de aquecimento	70
Figura 25: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,70V de aquecimento	72
Figura 26: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,70V de aquecimento	73
Figura 27: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,70V de aquecimento	75
Figura 28: Esquema de montagem do equipamento	90
Figura 29: Detalhe da montagem do equipamento	90
Figura 30: Cilindro completo	91
Figura 31: Dimensões da tampa	92
Figura 32: Posições dos termopares na tampa	93
Figura 33: Resistência circular	94
Figura 34: Dados de temperatura em função do tempo em H5 sem aquecimento nas extremidades	95
Figura 35: Dados de temperatura em função do tempo em H6 sem aquecimento nas extremidades	95

<i>Figura 36: Dados de temperatura em função do tempo em H7 sem aquecimento nas extremidades</i>	95
<i>Figura 37: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,25V de aquecimento nas extremidades</i>	96
<i>Figura 38: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,25V de aquecimento nas extremidades</i>	96
<i>Figura 39: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,25V de aquecimento nas extremidades</i>	96
<i>Figura 40: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,30V de aquecimento nas extremidades</i>	97
<i>Figura 41: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,30V de aquecimento nas extremidades</i>	97
<i>Figura 42: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,30V de aquecimento nas extremidades</i>	97
<i>Figura 43: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,40V de aquecimento nas extremidades</i>	98
<i>Figura 44: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,40V de aquecimento nas extremidades</i>	98
<i>Figura 45: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,40V de aquecimento nas extremidades</i>	98
<i>Figura 46: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,70V de aquecimento nas extremidades</i>	99
<i>Figura 47: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,70V de aquecimento nas extremidades</i>	99
<i>Figura 48: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,70V de aquecimento nas extremidades</i>	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Determinação de umidade (em base seca e em base úmida)	32
Tabela 2: Determinação da densidade real	33
Tabela 3: Determinação da densidade aparente	33
Tabela 4: Temperatura final em cada termopar para os experimentos realizados	34
Tabela 5: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, sem aquecimento nas extremidades	35
Tabela 6: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,25V de aquecimento nas extremidades	36
Tabela 7: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,30V de aquecimento nas extremidades	36
Tabela 8: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,40V aquecimento nas extremidades	37
Tabela 9: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,70V aquecimento nas extremidades	38
Tabela 10: Condutividade média e desvio padrão para os diferentes aquecimentos axiais e as diferentes alturas dos termopares	39
Tabela 11: Difusividade média e desvio padrão para os diferentes aquecimentos e para as diferentes alturas dos termopares	41
Tabela 12: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER1	45
Tabela 13: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER1	46
Tabela 14: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER2 em H5 sem aquecimento	48
Tabela 15: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER2 em H5 sem aquecimento	48
Tabela 16: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER3 em H5 sem aquecimento	50
Tabela 17: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER3 em H5 sem aquecimento	51
Tabela 18: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER4 em H5 sem aquecimento	53
Tabela 19: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER4 em H5 sem aquecimento	53
Tabela 20: Condutividade Térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 sem aquecimento	55
Tabela 21: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 sem aquecimento	57
Tabela 22: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 sem aquecimento	58
Tabela 23: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,25V de aquecimento	60
Tabela 24: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,25V de aquecimento	61
Tabela 25: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,25V de aquecimento	62
Tabela 26: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,30V de aquecimento	64
Tabela 27: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,30V de aquecimento	65
Tabela 28: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,30V de aquecimento	66
Tabela 29: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,40V de aquecimento	68

<i>Tabela 30: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,40V de aquecimento</i>	69
<i>Tabela 31: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,40V de aquecimento</i>	71
<i>Tabela 32: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,70V de aquecimento</i>	72
<i>Tabela 33: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,70V de aquecimento</i>	73
<i>Tabela 34: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,70V de aquecimento</i>	75
<i>Tabela 35: Condutividade térmica média (entre TER1 e TER4) e desvio padrão para os diferentes aquecimentos e alturas dos termopares</i>	76
<i>Tabela 36: Erro relativo dos valores obtidos de k entre regime permanente e regime transiente</i>	78
<i>Tabela 37: Difusividade térmica média (entre TER1 e TER4) e desvio padrão para os diferentes aquecimentos e alturas dos termopares</i>	79
<i>Tabela 38: Erro relativo dos valores obtidos de difusividade térmica</i>	80

RESUMO

Há diversas maneiras de se determinar as constantes térmicas, tais como a difusividade e a condutividade térmica dos materiais biológicos. Buscar um sistema que permita a modelagem matemática e simulação numérica capaz de auxiliar no processo de avanço científico referente ao conhecimento e a determinação de propriedades físicas de materiais biológicos é importante para a engenharia agrícola. Portanto, há a necessidade de se pesquisar métodos e/ou equações alternativas. Sendo assim, foi construído um sistema térmico de medição de difusividade e condutividade térmica constituído de cilindros concêntricos e entre os quais é colocada a amostra de soja inteira. A fonte de calor é colocada em seu eixo central. O sistema encontra-se isolado do ambiente externo e as superfícies circulares (tampas) são submetidas a um aquecimento para minimizar fluxo na direção axial, de forma que a transferência de calor ocorra preferencialmente na direção radial. A condutividade e a difusividade térmica foram determinadas em regime permanente, aplicando-se a 1ª Lei de Fourier, e em regime transiente, aplicando-se a solução numérica da 2ª Lei de Fourier com condições iniciais e de contorno adequadas, que foi resolvida pelo método numérico de diferenças finitas. Nos resultados obtidos pelas duas metodologias nota-se um erro relativo em torno de 23%, o qual é admissível se comparado com os valores difundidos na literatura. Pela possibilidade do acompanhamento e visualização do processo, aliado aos bons resultados obtidos, o sistema é útil como uma ferramenta didática.

ABSTRACT

The literature discloses many methods of determining thermal constants of biological materials. It is very important to the Agricultural Engineering to identify a system capable of mathematical modeling and numerical simulation to support the scientific advances on physical properties of biological materials. The search for new methods and equations turn to be very important. Based on these considerations, it has been constructed a thermal measuring system consisting of concentric cylinders to hold a soybean sample in study. Heat source is placed at the central axis, keeping insulated the cylindrical as well the circular cross sectional outer surfaces. Such a procedure is to permit only radial heat transfer minimizing the heat flux in the axial direction. Thermal diffusivity and conductivity has been determined by means of the First and the Second Fourier Laws, respectively in steady state and transient situations. Finite difference technique was applied to obtain the solutions under adequate initial as well as boundary conditions. The results from both methods showed a mean deviation of 23%: in close agreement with the literature. The experimental set up exhibited clear visualization turning to be an excellent teaching tool.

I INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades térmicas de materiais biológicos, como por exemplo a difusividade e a condutividade, é essencial para o desenvolvimento das ciências agrícolas e de alimentos, podendo ser empregado a uma variedade de objetivos específicos, tais como, predição da taxa de secagem ou distribuição de temperatura em materiais úmidos, sujeitos a diferentes condições de secagem, aquecimento ou resfriamento, otimização do desempenho de equipamentos de transferência de calor, reidratação, aparatos de esterilização, etc. Sendo que as propriedades térmicas podem variar de acordo com a natureza, variedade, teor de umidade e temperatura do produto (KAZARIAN e HALL 1965).

No estudo do comportamento térmico de materiais biológicos, tem-se assumido como apropriada a equação geral da difusão de calor, o que implica em admitir que os materiais biológicos formam um meio homogêneo, isotrópico e contínuo. Entretanto, os materiais biológicos formam espaços vazios entre si, onde a matéria fluida circula (ar, vapor de água e outros gases), transportando calor não só por difusão como também por convecção. Para materiais secos, a quantidade de calor transportada por convecção pode ser considerada desprezível e as constantes térmicas podem ser determinadas em regime permanente.

Por outro lado, quando se quer a determinação destas constantes em regime transiente, são necessárias considerações restritivas como simplificações na solução da 2ª Lei de Fourier ou a utilização de métodos numéricos.

Sendo assim, métodos e/ou equações alternativas devem ser pesquisadas. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo a determinação da condutividade e da difusividade térmica de materiais biológicos, o que pode ser realizado tanto pelos dados gerados pelo uso de um equipamento construído, quanto pelos gerados via simulação numérica do processo transiente.

II OBJETIVO

Os objetivos deste trabalho foram:

- Construir e avaliar um sistema de medição de difusividade e condutividade térmica de um material biológico;
- Verificar a funcionalidade do equipamento na determinação da difusividade e da condutividade térmica de um material biológico;
- Utilizar o equipamento na determinação das propriedades térmicas em regime permanente;
- Analisar a solução numérica da equação do modelo matemático para a determinação das propriedades térmicas em regime transiente;
- Analisar a utilização de aquecimento nas extremidades como forma de minimizar a migração axial de calor;

III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade termofísica do material a qual descreve a taxa do fluxo de calor através deste sob influência de um gradiente térmico. A condutividade térmica é um parâmetro físico importante para o estudo da transferência de calor, como por exemplo, a distribuição da temperatura em grãos, (CHANDRA e MUIR 1971). A importância da condutividade térmica de grãos está presente em quase todas as áreas de processamento de alimentos, como a secagem, aeração e resfriamento de grãos.

Segundo MOSEHNIN (1980), valores numéricos da condutividade térmica de materiais sólidos, granulares e porosos podem variar de acordo com a composição química, conteúdo de matéria fluida, estrutura física, estado, densidade, temperatura e teor de umidade do material. De acordo com o mesmo autor, para materiais biológicos, a dependência da condutividade térmica com a estrutura celular, densidade e umidade são maiores do que a da temperatura.

SWEAT (1974) determinou a condutividade térmica de várias frutas e legumes e concluiu que o conteúdo de umidade é a propriedade que mais afeta o valor da condutividade.

MUIR e VIRAVANICHAL (1972) afirmam que a temperatura é um dos principais fatores que influenciam as propriedades dos grãos, sendo de fundamental importância no controle da taxa de deterioração de grãos armazenados.

Segundo KAZARIAN e HALL (1965), a condutividade térmica de grãos e cereais é uma função linear do conteúdo de umidade, variando de 0 a 35% e com temperatura entre 20 a 48°C.

MOHSENIN (1980) considerou a migração de umidade, e que ela pode ser notada quando ocorre transferência de massa sempre que a diferença de temperatura existe em um meio permeável à umidade. Em muitos casos, este efeito se deve à evaporação na região aquecida, transmissão do vapor por difusão para uma região

resfriada e condensação nessa região. Nestas mesmas condições, o calor, na forma de calor latente, é transmitido por este mecanismo sendo adicionado ao calor transferido por condução. Este fenômeno de migração de umidade altera continuamente a condutividade térmica do material a ser testado.

Devido à migração de umidade, o uso de métodos de determinação de condutividade térmica, onde um longo período de tempo é requerido para se alcançar as condições específicas teóricas de transferência de calor, não são apropriados para materiais biológicos.

O estudo analítico da transmissão de calor foi proposto pelo cientista francês J.B.J. Fourier, em 1822. Fourier descreve que um gradiente de temperatura distribuído ao longo de uma espessura gera um fluxo de calor por unidade de área diretamente proporcional ao gradiente, definindo a constante de proporcionalidade, conhecida como condutividade térmica. A primeira Lei de Fourier pode ser expressa como (CHAPMAN, 1967):

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

onde:

Q = transferência de calor(W)

dado por Q = Ui;

onde:

U = voltagem(V)

i = amperagem(A)

A = área de transferência de calor(m²)

k = condutividade térmica(W/m°C)

T = temperatura (°C)

r = raio (m)

dT/dr = gradiente de temperatura ao longo do raio(°C/m)

O sinal negativo da equação indica que o calor é transferido em sentido contrário ao do gradiente de temperatura. Deste modo, qualquer método para determinar o valor da condutividade térmica (k), em regime permanente, requer o conhecimento do perfil de temperatura bem como a quantificação simultânea do fluxo de calor.

3.2 Difusividade térmica

A difusividade térmica expressa a variação da temperatura do material quando submetido a um processo de resfriamento ou aquecimento, sendo descrita em função de outras três propriedades que são a condutividade térmica, a densidade e o calor específico:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

onde:

α = difusividade térmica (m²/s)

ρ = densidade (kg/m³)

C_p = capacidade calorífica (J/kg°C)

Nesta equação, o denominador indica a capacidade do produto de absorver calor, ao passo que o numerador indica a capacidade do produto em transferir calor através dele.

Em situações onde a transferência de calor ocorre em regime transiente, a difusividade térmica é expressa pela 2ª lei de Fourier, unidirecional (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 1960):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

onde:

t = tempo(s)

Normalmente a difusividade térmica é obtida por métodos de determinação transientes. Para determinar a capacidade calorífica de materiais biológicos usualmente utiliza-se a calorimetria de gelo ou o método da mistura. DESHPANDE e BAL (1999) determinaram o calor específico dado em J/kg°C da soja pelo método da mistura para temperatura de 315K e conteúdo de umidade entre 8,1 e 25% obtendo uma correlação linear com o conteúdo de umidade:

$$C_p = 1444(1 + 4,06 \times 10^{-2} U_{bs}) \quad (4)$$

onde:

U_{bs} = Umidade em base seca (%)

As relações entre capacidade calorífica e conteúdo de umidade são relatadas para o milho (KAZARIAN e HALL, 1965) e para a aveia (OXLEY, 1944). SHARMA e THOMPSON (1973) determinaram para o sorgo a capacidade calorífica, utilizando o método da mistura, e a condutividade térmica, utilizando a fonte linear de calor em função do conteúdo de umidade.

Charm (1971) e Heldman (1975) citados por DESHPANDE e BAL (1999) determinaram correlações da capacidade calorífica com a composição do material estudado (gordura, proteína, umidade, etc).

ALAM e SHOVE (1973b) conduziram estudos experimentais para determinar o comportamento higroscópico e a capacidade calorífica da soja. Baseado nas isotermas de desorção, o calor latente de vaporização também foi determinado. Modelos matemáticos foram desenvolvidos para a capacidade calorífica e para o calor latente da soja.

De acordo com Tavman, Tavman e Evcin (1997), citados por NUNES (2000), as propriedades de alguns alimentos (grãos, produtos porosos e pó) são mais difíceis de se determinar devido à estrutura heterogênea desses materiais. O valor

da difusividade térmica do material é afetado pela umidade, temperatura, porosidade e composição. Os mesmos autores determinaram o valor da difusividade térmica de duas variedades de trigo, comprovando que essa propriedade térmica foi influenciada pelo conteúdo de umidade.

SHYAMAL, CHAKRAVERTY e BANERJEE (1994) determinaram para o trigo, trigo cozido e sem fibra com diferentes teores de umidade, a difusividade e a condutividade térmica e concluíram que a condutividade aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade.

Reidel (1969) citado por CHOI e OKOS (1986) apresentou uma expressão para a difusividade térmica dada em W/m^2 , que abrange um grande número de produtos alimentícios, para os produtos com teor de umidade acima de 40%:

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \times 10^{-6}) X_a \quad (5)$$

onde:

α_w = difusividade térmica da água a temperatura desejada (m^2/s)

X_a = conteúdo de umidade do material (%)

Martens (1980) citado por CHOI e OKOS (1986) determinou a difusividade térmica, dada em W/m^2 , considerando os componentes básicos dos alimentos, como água (X_a), proteína, gordura e carboidratos, a uma temperatura de 20°C obtendo-se a seguinte expressão:

$$\alpha = (0,146 X_a + 0,100 X_g + 0,075 X_p + 0,082 X_c) 10^{-6} \quad (6)$$

onde:

X_a = conteúdo de umidade do material (%)

X_c = teor de carboidrato do material (%)

X_g = teor de gordura do material (%)

X_p = teor de proteína do material (%)

3.3 Estudo de caso: regime permanente

A maioria dos valores relatados para condutividade térmica de grãos tem sido determinada pelo fluxo de calor constante entre os grãos. A equação de transferência de calor que descreve a distribuição de temperatura, quando resolvida para condição de estado permanente, gera uma técnica relativamente simples para determinação da condutividade térmica (KAZARIAN e HALL, 1965).

Devido à sua simplicidade, este foi um dos primeiros métodos utilizados para materiais biológicos. Nesse caso, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste. O fluxo de calor constante, obtido após o equilíbrio, é medida para uma dada área seccional perpendicular ao fluxo e um gradiente de temperatura. Aplicando-se a 1ª Lei de Fourier de transferência de calor (equação 1), a condutividade média pode ser calculada.

Os métodos em estado estacionário podem ser divididos em: método das placas paralelas, método dos cilindros concêntricos e método das esferas concêntricas. Estes três métodos requerem uma solução de equações de transferência de calor para um regime estacionário em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas, respectivamente (FREIRE, 1981).

KAZARIAN e HALL (1965) e FREIRE (1981) apresentaram as desvantagens do estudo de caso em regime permanente como a de requerer muito tempo para realizar o experimento, podendo acarretar numa migração de umidade da amostra (umidade superior a 10%) e a dificuldade para dimensionar a amostra que deve ter formas geométricas especiais, ocorrência de erros experimentais com perdas de calor ao ambiente, etc.

PARK, ITO e LEITE (2002) determinaram a condutividade térmica de grãos triturados de soja a diferentes granulometrias e dimensões. Utilizaram um equipamento de coluna fechada, construído por SHIKI e PARK (1998), que opera em regime permanente. Os resultados obtidos mostram que a migração de umidade deve ser considerada na determinação da condutividade.

JASSANSKY E BILANSKI (1973) apontam como desvantagem o estudo de caso em regime permanente o fato de que os instrumentos utilizados nos

experimentos certamente não são portáteis e exigem consideráveis cuidados e experiência para manipulá-los.

Para a determinação da condutividade térmica em regime permanente, no caso de duas superfícies cilíndricas concêntricas de comprimento L onde o calor é transferido por condução apenas no sentido radial, a área para escoamento de calor radial no sistema é dada por:

$$A = 2 \pi r L \quad (7)$$

onde:

L = comprimento (m)

E a substituição da equação (7) na equação (1) conduz a:

$$Q = -(2 \pi L k) r \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

Resolvendo-se a equação (8) para as condições (r = R1; T = T₁) e (r = R2; T = T₂) obtém-se (GUBULIN e FREIRE, 1990; MOHSENIN, 1980; PARK, ALONSO e NUNES, 1999):

$$Q = \frac{2 \pi L k (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)} \quad (9)$$

onde:

R1 = raio interno (m)

R2 = raio externo (m)

T₁ = temperatura em R1 (°C)

T₂ = temperatura em R2 (°C)

E a condutividade térmica poderá ser determinada por:

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{2 \pi L (T_1 - T_2)} \quad (10)$$

3.4 Estudo de caso: regime transiente

A condição fundamental para o estudo em regime transiente é que o valor pontual da variação da temperatura no tempo seja diferente de zero.

O estudo em regime transiente é muito utilizado em medidas de condutividade e difusividade térmica devido às suas vantagens tais como: rapidez na determinação e as condições de teste se aproximarem com as condições de processamento.

Para os materiais agrícolas perecíveis, este estudo é adotado devido à grande vantagem de requerer menor tempo de teste em comparação ao outro. No entanto, algumas dificuldades são associadas a este estudo, tais como a obtenção de medidas de temperatura, a localização dos termopares e o processo de transferência de calor convectiva.

Entre os estudos em regime transiente destacam-se: Método de Fitch, Método da Fonte Linear de Aquecimento, Método proposto por Dickerson (1965), Método da Resposta Freqüente e o Método de Análise de camada conjunta (MOHSENIN, 1980).

MAGEE (1995) cita em seu trabalho algumas limitações e fontes de erro dos estudos transientes (log method e método da sonda), entre elas: a existência de uma diferença de temperatura entre as paredes internas e externas do cilindro, que é considerada desprezível, a precisão do equipamento de medida de temperatura e a variação de densidade e teor de umidade entre as amostras.

Para o regime transiente, na equação geral da difusão ou condução de calor devem ser especificadas as condições de contorno e inicial.

Em coordenadas cilíndricas, a equação geral de difusão de calor em regime transiente tem a seguinte forma (CHAPMAN, 1967), para $T=T(r, \phi, z)$:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (11)$$

onde:

r = raio ou direção radial

ϕ = direção angular

z = direção axial

Considerando que $\partial T/\partial \Phi = 0$, $\partial T/\partial z = 0$ e a formulação do problema em termos de $\theta = T - T_{\infty}$, para $\theta = \theta(r, t)$, a equação (7) pode ser escrita como (ARPACI, 1966):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (12)$$

onde:

$$\theta = T - T_{\infty} (\text{°C})$$

T_{∞} = Temperatura no ambiente (°C)

WATTS e BILANSKI (1973), utilizaram um método transiente para determinar o valor da difusividade térmica da soja. O método consistia em submergir um grão de soja com sensores de temperatura na sua superfície e no centro, em banhos de óleo sob o efeito de agitação a diferentes temperaturas, registrando-se os valores da temperatura na superfície e no centro do grão. Encontraram uma difusividade térmica média de $4,5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$. Pequenos efeitos do conteúdo de umidade e temperatura foram notados.

SREENARAYANAN e CHATTOPADHYAY (1986) determinaram a condutividade ($0,086 \text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ a 7% de umidade e $0,158 \text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ a 15%) e difusividade térmica ($9,34 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ a 7% de umidade e $12,8 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ a 15%) de farelo de arroz em função do conteúdo de umidade em regime transiente. O equipamento utilizado está baseado na teoria da fonte linear de aquecimento. O método da fonte linear consiste em aquecer a massa de grãos, inicialmente em temperatura uniforme através de uma fonte linear de calor de potência constante colocada ao longo do eixo central (KAZARIAN e HALL, 1965; MOHSENIN, 1980; CHANG, 1986).

DESHPANDE, BAL e OJHA (1996) utilizaram o mesmo equipamento que SREENARAYANAN e CHATTOPADHYAY (1986) para determinar a condutividade e difusividade térmica da soja em função do conteúdo de umidade. Determinaram a condutividade térmica para conteúdos de umidade entre 8,1 e 25% em base seca. Encontraram que a condutividade, assim como a difusividade, sofre um aumento linear com o aumento da umidade. Para a condutividade, esta aumenta de $0,1157$ para $0,1756 \text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ e a difusividade aumenta de $8,17 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ para $8,53 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$.

NUNES (2000) determinou a condutividade e a difusividade térmica utilizando o método da sonda encontrando para a soja seca o valor de 0,07 a 0,13W/m°C de condutividade e 2,90 a 4,46x10⁻⁸m²/s para a difusividade.

A determinação da condutividade térmica utilizando a fonte linear de calor também foi pesquisada por CHANG (1986) em duas variedades de trigo, milho e sorgo. Para cada tipo de grão, utilizaram três níveis de conteúdo de umidade. Para cada nível de conteúdo de umidade, utilizaram-se três níveis de densidade totalizando 9 pontos para cada grão. CHANG (1986) encontrou que a condutividade térmica aumenta com o aumento da densidade assim como com o aumento do conteúdo de umidade. A diferença na condutividade térmica entre as duas diferentes variedades de trigo foi considerada pequena.

Segundo JASANSKY e BILANSKI (1973) os métodos transientes de fluxo de calor minimizam a migração de umidade, além de manterem a precisão dos métodos de regime permanente. Os mesmos autores relatam em seu trabalho que os resultados encontrados indicaram ser o método transiente de fonte linear de calor conveniente e suficientemente preciso para as investigações da condutividade térmica de soja inteira e moída.

Por causa de temperaturas diferentes em armazéns de grãos pode ocorrer migração de umidade e conseqüentemente deterioração. CONVERSE, GRAVES e CHUNG (1973) estudaram a transferência transiente de calor dentro de armazéns cilíndricos de trigo. A pesquisa examinou o efeito da mudança na temperatura do ar externo. Desenvolveram uma equação de transferência transiente de calor para descrever a distribuição de temperatura dentro de armazéns de concreto.

3.5 Estudo de caso: equilíbrio dinâmico

Segundo KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981) o método do equilíbrio dinâmico oferece, para o cálculo das propriedades térmicas de grãos, a combinação ideal da precisão dos métodos em regime permanente com a rapidez dos métodos transientes.

Jackson e Kirkhan (1958) mencionado por NUNES (2000), citam em seu trabalho que migração de umidade em solos tem sido assumida como desprezível em determinações laboratoriais de coeficientes de condutividade térmica e difusividade térmica nos mais variáveis métodos. Portanto as medidas convencionais das constantes térmicas em solos úmidos resultam em valores aparentes por não considerarem que o calor, aplicado nas determinações, causa transferência de umidade, a qual interfere na transmissão de calor.

Jackson (1957) citado por NUNES (2000) pesquisou a influência da umidade na determinação da difusividade de solos úmidos, utilizando o método do equilíbrio dinâmico. O método em questão permitia que a migração da umidade se mantivesse em valor mínimo. De Vries (1950), mencionado por TERESO (1984), apresenta um tratamento teórico para resolver o problema da convecção na determinação da condutividade térmica. A composição do solo foi considerada para se determinar a difusividade térmica, ou seja, a difusividade térmica de cada componente foi considerada em separado, especificando-se a disposição e tamanho das partículas.

No estudo do comportamento térmico do solo, as variações de temperatura causadas pelo dia e pela noite, geram condições harmônicas de contorno. TERESO, DAL FABBRO e ABRAHÃO (2000), utilizaram a equação geral da condução do calor expressa em coordenadas cartesianas para determinar as soluções analíticas e por elementos finitos do solo nessas condições, considerando um sistema semi-infinito, homogêneo, isotrópico e contínuo.

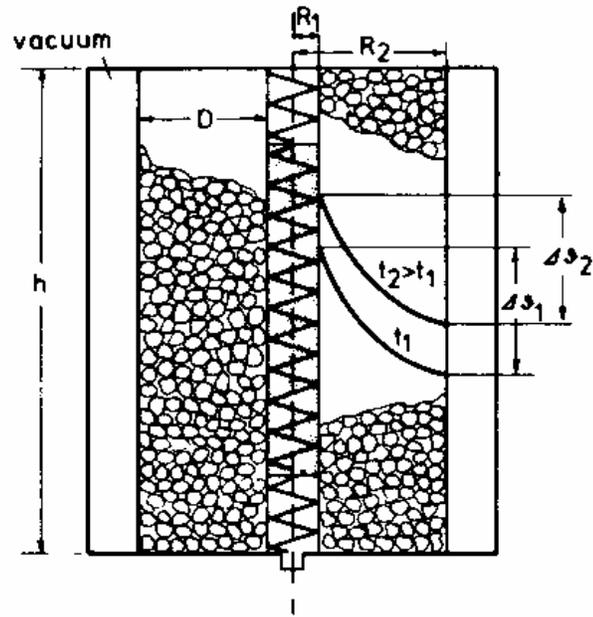
DAL FABBRO e NUNES (2000) desenvolveram e utilizaram um aparelho capaz de direcionar a distribuição radial da temperatura necessários na aplicação do método do equilíbrio dinâmico, utilizando a equação geral de difusão de calor expressa em coordenadas cilíndricas apresentada por ÖZISIK (1968). Experimentalmente a condição harmônica da face interna do cilindro foi obtida através de uma onda sinusoidal gerada por um mecanismo eletromecânico, o qual alternava a passagem de água a diferentes temperaturas. Testaram para amostras de solos e os resultados foram comparados com os dados encontrados na literatura. A metodologia desenvolvida foi considerada adequada para aplicações futuras no estudo do comportamento térmico de solos úmidos. O mesmo

equipamento foi utilizado por NUNES (2000) para determinação das propriedades térmicas da soja com diferentes granulometrias e umidades obtendo dados semelhantes aos de outros métodos (sonda e regime permanente) portanto o equipamento é adequado para a determinação das propriedades de grãos úmidos e secos.

GUO e MALKIN (1995), analisaram a distribuição de temperatura gerada na superfície de uma peça submetida a um esmerilhamento. Resultados numéricos foram obtidos utilizando-se o método das diferenças finitas indicando que a temperatura da peça aumentava rapidamente no início do esmerilhamento, posteriormente atingindo a condição do equilíbrio dinâmico (se a peça fosse suficientemente longa) e continuava aumentando durante o final do esmerilhamento.

NASTAC (1998), derivou uma solução analítica exata de um problema de transferência axial de calor transiente e unidirecional num domínio semi-infinito. Foi realizada a comparação entre as soluções para o estado transiente e o estado do equilíbrio dinâmico.

KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981) mediram a condutividade e a difusividade térmica de grãos pelo método do equilíbrio dinâmico em cilindros concêntricos. O equipamento utilizado consistia de cilindros concêntricos, uma fonte de energia, um aquecedor localizado no interior do cilindro e um registrador de temperatura. Os termopares foram colocados dentro e fora do cilindro, para se evitar as perdas de calor para a atmosfera, o cilindro foi revestido de uma camada com vácuo e mais externamente por uma camada de 100mm de poliuretano, atendendo as condições da solução da equação diferencial de condução de calor para esta situação. O esquema do equipamento utilizado é apresentado na figura1:



Fonte: KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981)

Figura 1: Esquema do equipamento para o método do equilíbrio dinâmico.

Os mesmos autores derivaram com base nos resultados encontrados, a equação geral da condutividade térmica em função da temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) e do teor de umidade em base úmida(%) para milho, trigo, cevada, aveia, centeio e uva passa onde os coeficientes foram determinados experimentalmente.

KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981), compararam os resultados da condutividade e difusividade térmica obtidos para o milho pelo método do equilíbrio dinâmico com outros trabalhos que utilizaram diferentes métodos. A comparação dos resultados encontra-se no quadro 1.

Quadro 1: Comparação da condutividade térmica do milho para diferentes métodos

Autor	Ubs (%)	Método	Equipamento	k (W/m°C)
Oxley (1944)	13,2	Permanente	2 esferas concêntricas	0,1765
Egorov (1960)	9,1- 20,0	Transiente	equipamento de placas	0,43-0,53
Kazarian e Hall (1965)	0,9- 30,2	Transiente	cilindro com aquecimento axial	0,121- 0,148
Pabis, Bilovitska, e Gadai (1970)	0- 26,6	Transiente	equipamento de placas	0,16-0,33
Kusterman, Scherer e Kutzbach (1981)	2,0- 40,0	Equilíbrio Dinâmico	2 cilindros concêntricos com aquecimento interno	0,11-0,18

Fonte: KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981).

3.6 Métodos numéricos

As soluções analíticas dos problemas transientes estão limitadas a geometrias e condições de contorno simples. Na literatura, (CARSLAW e JAEGER, 1959, SCHNEIDER, 1955, ARPACI, 1966 e ÖZISIK, 1980) encontram-se diversas soluções analíticas. No entanto em muitas geometrias, ou com muitas outras condições de contorno, fica impossível a adoção de técnicas analíticas e é necessário lançar mão de métodos de diferenças finitas (M. D. F). Esses métodos são facilmente generalizados para o caso de problemas transientes (INCROPERA, 1992).

Os métodos numéricos para resolução de problemas diferenciais são métodos que geram problemas discretos associados cujas soluções são próximas à solução dos problemas diferenciais. Isso pode ser feito pelo método de diferenças finitas (M.D.F.), caracterizado pela aproximação dos operadores diferenciais ou pela aproximação dos espaços das funções admissíveis de dimensão infinita por espaços de dimensão finita (AMENDOLA, 1996).

Segundo o que consta em BURDEN, FAIRES E REYNOLDS (1981), cada um dos métodos (M.D.F. e M.E.F.) apresenta vantagens e desvantagens próprias que

se revelam de acordo com a equação do problema bem como das condições iniciais e/ou de contorno do mesmo, sendo o M.E.F. o que exige embasamento teórico matemático mais complexo.

Há diversas maneiras de fazer a discretização das equações de diferenças finitas essencialmente caracterizadas segundo o nome que levam: método explícito e método implícito e às propriedades de estabilidade (INCROPERA, 1992). O método implícito é incondicionalmente estável e gera um sistema linear de equações algébricas que deve ser resolvido com precisão, exigindo esforço computacional. O método explícito apresenta simplicidade computacional uma vez que gera um conjunto de equações lineares independentes, porém deve obedecer a critérios de estabilidade.

ALAM e SHOVE (1973b) desenvolveram modelos matemáticos para a capacidade calorífica da soja para conteúdo de umidade entre 0 e 38% em base seca e temperatura entre 53,5 e 82,5°F. Os mesmos autores em ALAM e SHOVE (1973a), desenvolveram um modelo computacional para a simulação da secagem de soja. As relações que definem o conteúdo de umidade de equilíbrio, a capacidade calorífica, o calor latente de vaporização e a densidade aparente foram desenvolvidas para serem usadas em um programa de simulação, em linguagem Fortran, para prever o perfil de umidade e de temperatura. Para verificar o modelo de secagem, os dados obtidos na simulação foram comparados com dados de secagem experimentais. Os dados obtidos na simulação foram muito similares aos observados experimentalmente. Possibilidades de erros nas amostras podem ter ocorrido como a variação nos registros das condições atmosféricas e a possibilidade do aquecimento do produto estocado para níveis de umidade acima de 15% em base seca. Outro importante fator que pode ter contribuído para a diferença dos valores experimentais e os simulados é a suposição de que todos os processos são reversíveis. No estudo higroscópico da soja encontrou-se que havia uma histerese considerável nas isotermas de desorção especialmente em baixas temperaturas.

MISRA e YONG (1980) estudaram o efeito do encolhimento e da difusão de umidade durante a secagem em produtos biológicos considerando a solução numérica para determinar simultaneamente o encolhimento e o conteúdo de

umidade. Assumiu-se que a difusividade mássica depende da densidade e a concentração de umidade. Neste trabalho, utilizou-se a metodologia de elementos finitos considerando-se esferas.

DAL FABBRO e NUNES (2000) mediram a difusividade térmica do solo em condições de equilíbrio dinâmico por métodos analíticos e por elementos finitos. A equação geral da condução de calor, expressada em coordenadas cilíndricas, foi solucionada para o tempo tendendo a infinito, mantendo a face interna em condições harmônicas de contorno. A condição da face externa era de temperatura constante. A solução foi desenvolvida através das equações de Bessel do primeiro tipo, de primeira e segunda ordem. A equação transcendental de Bessel foi calculada numericamente através de um programa BASIC, o qual também fornecia as raízes da equação.

3.7 Propriedades físicas

Para determinar as propriedades térmicas de um produto é necessário determinar suas propriedades físicas tais como a densidade real, densidade aparente e conteúdo de umidade.

DESHPANDE, BAL e OJHA (1993) determinaram a dependência das propriedades físicas da soja com o conteúdo de umidade variando entre 8,7 a 25% em base seca. A densidade real, a aparente e a porosidade diminuíram linearmente com o aumento da umidade enquanto que as dimensões (comprimento, volume, área, etc) aumentaram com o aumento do conteúdo de umidade.

MANDHYAN e PRASAD (1994) estudaram a variação da densidade aparente e o coeficiente de fricção de partículas de soja em relação ao tamanho de partícula e ao conteúdo de umidade. Foram estudados os efeitos do conteúdo de umidade e da temperatura no calor específico tanto quanto o efeito da temperatura, do conteúdo de umidade e do tamanho de partícula na condutividade térmica. Baseado nestes resultados, as equações da regressão e os coeficientes de correlação apropriados foram desenvolvidos para abranger estas variações.

A condutividade térmica de grãos é afetada pelo conteúdo de umidade e pela densidade aparente, que mudam durante os processos de secagem e de aeração. Além disso a densidade do grão varia com o método utilizado no preenchimento do recipiente para a determinação da densidade. CHANG (1986) estudou o efeito da densidade aparente e do conteúdo de umidade na condutividade térmica de grãos de trigo, milho e sorgo. Obteve como resultados a condutividade térmica aumentando linearmente com o aumento da densidade, considerando o conteúdo de umidade constante. Considerando a densidade constante, a condutividade térmica diminui com o aumento do conteúdo de umidade.

IV MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do equipamento

O equipamento construído para a determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais, adaptado de KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981), é apresentado em corte na Figura 2:

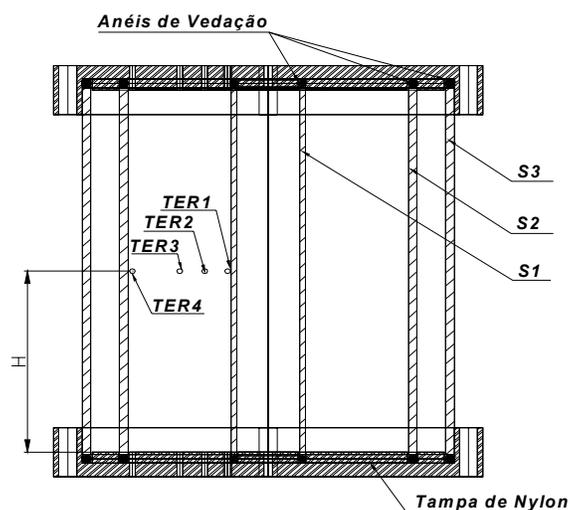


Figura 2: Corte do equipamento construído

A figura 2 mostra um corte do equipamento construído que consiste de 3 cilindros concêntricos de vidro de 0,150m de altura: o interior S1 ($r=0,013\text{m}$); o exterior S2 ($r=0,052\text{m}$) e o isolante S3 ($r=0,065\text{m}$). Os cilindros de vidro possuem espessura de 3mm. O cilindro S3 é colocado para isolar o sistema do ambiente externo. Em Apêndice 1 são mostradas fotos do esquema de montagem do equipamento.

Ao longo da direção longitudinal de S1 é colocada uma resistência elétrica central, fixada em seu eixo geométrico, conectada a uma fonte de alimentação de tensão que permite a variação da corrente e da tensão até 30V e 2A, podendo gerar diferentes fluxos de calor. As extremidades circulares (que possuem resistências elétricas para aquecimento) são fechadas com tampas de Nylon. Essas resistências circulares estão conectadas a uma fonte de alimentação de

tensão que permite a variação da corrente e da tensão até 30V e 2A, podendo gerar diferentes fluxos de calor.

O material biológico é colocado entre os cilindros S1 e S2 sem que haja compactação. A temperatura da amostra do material biológico analisado é registrada com o uso de termopares colocados radialmente neste espaço à altura H da amostra em 4 posições distintas: TER1($r=0,013m$), TER2($r=0,022m$), TER3($r=0,031m$) e TER4($r=0,049m$). As extremidades dos termopares estão conectadas a uma unidade registradora de dados (*data logger*) – Testostor 171-8 TC - acoplada a um microcomputador para a realização das leituras e armazenamento das temperaturas lidas pelos termopares.

4.2 Material biológico

O material biológico utilizado na determinação da condutividade e da difusividade foi soja inteira caracterizada como:

Produtor: Instituto Agronômico de Campinas

Registro MAA: nº 1567-p

Semente de: soja

Cultivar: IAC-19

Procedência: Votuporanga

Lote nº: IA47/01

Germinação em Julho/2001: 92%

Germinação mínima: 70%

Validade: maio/2002

Pureza física: 99,9% , peneira 12

A caracterização da amostra do material foi feita pela umidade, densidade real e densidade aparente, como descrito a seguir.

4.3 Caracterização física do material biológico

A soja utilizada nos experimentos é inteira e caracterizada fisicamente em função do seu conteúdo de umidade (em base seca e úmida), densidade real e densidade aparente.

4.3.1 Determinação do conteúdo de umidade

Para a determinação da umidade foram separadas amostras de cerca de 5g, pesadas em balança analítica. As amostras foram levadas a uma estufa de convecção forçada a uma temperatura de 103°C por 72 horas (ASAE, 1991) para a obtenção do peso seco final. O conteúdo de umidade é determinado através das equações (13) e (14):

Umidade em base úmida

$$U_{bu} = \frac{\textit{peso inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} \times 100 \quad (13)$$

onde:

U_{bu} = umidade em base úmida (%)

Peso inicial = peso inicial da amostra (g)

Peso final = peso final da amostra (g)

Umidade em base seca

$$U_{bs} = \frac{\textit{peso inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso final}} \times 100 \quad (14)$$

4.3.2 Determinação da densidade real

A densidade real do material biológico foi determinada pelo método picnométrico, (princípio de Arquimedes) utilizando água destilada como fluido picnométrico.

Colocou-se em cinco provetas graduadas de 250ml, 150ml de água destilada. Em seguida, pesaram-se cinco amostras de aproximadamente 75g utilizando-se uma balança semi-analítica, precisão de 0,01g. Colocou-se cada amostra em uma proveta e anotou-se o volume final da proveta (água e amostra).

A densidade é obtida pela equação (15):

$$\rho_{real} = \frac{M_{amostra}}{V_{final} - V_{inicial}} \quad (15)$$

onde:

ρ_{real} = densidade real (kg/m³)

$M_{amostra}$ = massa da amostra (kg)

V_{final} = Volume do fluido picnométrico mais amostra (m³)

$V_{inicial}$ = Volume inicial do fluido picnométrico (m³)

4.3.3 Determinação da densidade aparente

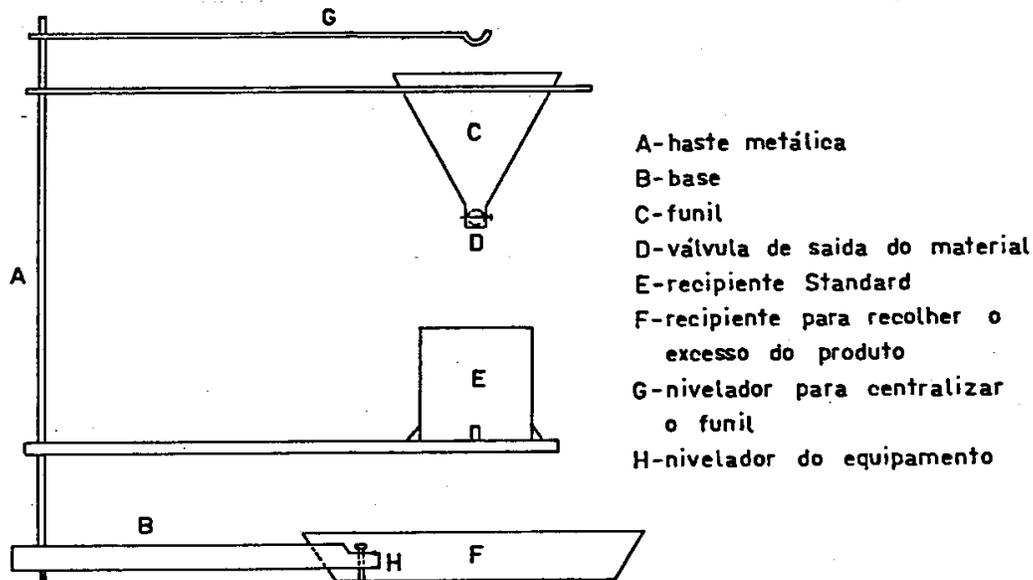
A determinação foi realizada de acordo com BENEDETTI (1987), utilizando-se um equipamento para a determinação do peso específico aparente como mostra a figura 3. Foram realizadas cinco repetições. Primeiramente pesou-se o recipiente padrão vazio, de volume conhecido e em seguida colocou-se o material no “funil” abrindo-se a válvula para o escoamento. O escoamento deve ser constante e livre, sem qualquer interferência. Posteriormente pesou-se o recipiente com o material numa balança semi-analítica, precisão de 0,01g, calculando-se a densidade aparente pela seguinte equação (16):

$$\rho_{ap.} = \frac{M_{amostra}}{Vol. recip.} \quad (16)$$

onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (kg/m³)

Vol. recip. = Volume do recipiente (m³)



Fonte: BENEDETTI (1987)

Figura 3: Aparelho de determinação de densidade aparente

4.4 Obtenção dos dados experimentais

Para a condução dos experimentos, o material analisado (cerca de 800g) foi colocado no espaço anular entre os cilindros S1 e S2. A resistência central de aquecimento foi ligada à fonte de tensão em 1,5A e 3V fornecendo um valor fixo de transferência de calor de 4,5W para o material biológico analisado. A área considerada para o cálculo do fluxo de calor é a área da superfície do cilindro S1, de raio $r=0,013\text{m}$ e altura de $0,140\text{m}$ (desconsiderou-se a altura do cilindro utilizada para fechar o equipamento) gerando-se um fluxo de calor de $393,7\text{W/m}^2$, denotado por q_f .

Os termopares TER1($r=0,013\text{m}$), TER2($r=0,022\text{m}$), TER3($r=0,031\text{m}$) e TER4($r=0,049\text{m}$) foram colocados em três alturas (H) diferentes a partir da extremidade: H7= 0,07m (à meia altura do cilindro); H6=0,06m e H5=0,05m. As resistências elétricas das extremidades circulares foram ligadas a diferentes voltagens de aquecimento (0,00V, 0,25V, 0,30V, 0,40V e 0,70V) para verificar a minimização das possíveis transferências de calor axial. O tempo total de aquisição de dados foi de 4 horas. As aquisições foram feitas em intervalos de 10s.

Porém, existiu uma certa dificuldade em fixar os termopares nas posições descritas já que a guia feita para os termopares era fina e maleável. O que tornou a fixação dos termopares nas posições indicadas imprecisa, principalmente para os termopares intermediários (TER2 e TER3). Guias mais largas foram testadas, porém conduziam calor e foram descartadas.

4.5 Determinação da condutividade térmica: Regime permanente

Os dados considerados na determinação da condutividade térmica em regime permanente são os da aquisição de dados de temperatura correspondente a transferência de calor de 4,5 W (1,5A e 3,0V). A condutividade foi determinada pela equação (10).

4.6 Determinação da condutividade térmica: Regime transiente

A determinação da condutividade térmica em regime transiente foi feita utilizando métodos numéricos para a busca da solução aproximada da 2ª Lei de Fourier. Para tanto, definiu-se o modelo matemático, o método numérico e o algoritmo de acordo com o que se segue:

4.6.1 Modelo matemático

Para a análise numérica do problema de determinação da condutividade térmica, considerou-se inicialmente a descrição física do processo para o estabelecimento do modelo matemático simplificado que consiste das considerações:

- O processo ocorre na região compreendida entre dois cilindros concêntricos de raios $R1(r=0,013m)$ e $R2 (r=0,049m)$, o que leva à seleção de coordenadas cilíndricas;
- O cilindro é considerado infinito, o que estabelece a unidimensionalidade;
- A condutividade térmica é considerada constante durante o processo;
- A temperatura inicial da amostra na região em estudo é uniforme ao longo do raio, o que leva à condição inicial;
- O aquecimento da amostra ocorre a partir de $R1$ sendo homogêneo ao longo de toda a altura,
- O fluxo de calor (q_f) do aquecimento é considerado constante em $R1$, o que estabelece uma das condições de contorno;
- A superfície externa em $R2$ é considerada isolada, o que estabelece a outra condição de contorno;

Sendo assim, utilizando a equação do modelo matemático, para a variável T (temperatura), que está baseada na 2ª Lei de Fourier unidirecional, a equação (3) pode ser escrita como (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT (1960)):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \partial T}{\partial r} \right); \quad R1 < r < R2 \quad (17)$$

Utilizando a regra da cadeia na equação (17) tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (18)$$

e para qual consideramos as:

$$1) \text{ condição inicial } T(r,0) = T_{\infty}; \quad r \in (R1, R2) \quad (19)$$

onde:

T_{∞} = Temperatura ambiente (°C) obtida dos dados experimentais;

2) condições de contorno:

2.1) fluxo de calor constante em $R1=0,013\text{m}$:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R1} = qf; \quad (20)$$

2.2) superfície isolada em $R2=0,049\text{m}$:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R2} = 0; \quad (21)$$

A condição de contorno em $R1$ é denominada de Newman, ou condições de contorno de 2ª espécie, onde existe um fluxo de calor constante. A condição de contorno em $R2$ é um caso especial da condição descrita anteriormente, onde a superfície está isolada.

4.6.2 Método numérico

O método numérico de diferenças finitas explícito foi selecionado para a resolução da equação (17), sujeito às condições (3), (4) e (5). A equação de diferenças finitas é escrita ao longo do tempo e para cada ponto da região ($R1,R2$) segundo o estabelecimento de Δr , intervalo espacial entre as determinações, e Δt , intervalo temporal.

A convenção para a discretização é $T_j^i = T(i\Delta t, j\Delta r)$, onde o índice i está relacionado com o tempo e o índice j está relacionado com o espaço. A equação (18) discretizada utilizando o método explícito é (INCROPERA, 1992):

$$T_j^i = fo \left(1 - \frac{\Delta r}{r(j)} \right) T_{j-1}^{i-1} + \left(fo \left(-2 + \frac{\Delta r}{r(j)} \right) + 1 \right) T_j^{i-1} + fo T_{j+1}^{i-1} \quad (22)$$

onde:

$i = 1, \dots, p$;

p = número de divisões no tempo;

$j = 1, \dots, m$; $j=1 \Leftrightarrow R1$ e $j=m \Leftrightarrow R2$;

m = número de divisões no espaço;

fo = número de Fourier = $\frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right)$ ();

$r(j)$ = raio relacionado a cada ponto no espaço estudado (m);

A condição inicial (19) discretizada é:

$$T_j^1 = T_\infty, \quad j = 1, \dots, m \quad (23)$$

As condições de contorno 20 e 21 discretizadas são:

$$T_1^i = T_2^i + b, \quad i = 1, \dots, p \quad (24)$$

$$T_m^i = T_{m-1}^i, \quad i = 1, \dots, p \quad (25)$$

onde:

$$b = \frac{qf \Delta r}{k} \quad (26)$$

onde:

qf = fluxo de calor (W/m^2)

De acordo com INCROPERA (1992), o critério de estabilidade é determinado pela exigência de que o coeficiente associado ao nodo de interesse (T_j^i) no instante anterior (T_j^{i-1}) seja maior ou igual a zero. Para a equação (22), este critério de estabilidade se expressa como:

$$\left(fo \left(-2 + \frac{\Delta r}{r(j)} \right) + 1 \right) \geq 0 \quad (27)$$

De onde se obtém que o critério mínimo de estabilidade a ser satisfeito é $2 \cdot fo \leq 1$, ou seja:

$$\frac{2k}{\rho C_p} \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right) \leq 1 \quad (28)$$

Para valores estabelecidos de Δr e k , o critério de estabilidade pode ser usado para determinar o valor máximo permissível para o valor de Δt .

4.6.2.1 Estudo da influência da malha

O primeiro passo a ser realizado é a investigação do tamanho de Δr permitido. O que deve ser feito diminuindo o mesmo, a partir de um valor de referência, e até um outro a partir do qual a solução numérica não mostra variação. Isto deve ser realizado em conjunto com o valor de Δt para garantir o critério de estabilidade. (FORTUNA, 2000).

4.6.3 Algoritmo

O algoritmo associado ao problema discretizado foi implementado no programa computacional MATLAB 6.1:

```
% Algoritmo para resolução da 2ª Lei de Fourier por diferenças finitas explícita
% Entrada dos parâmetros do problema:
R1          % Raio interno (m)
R2          % Raio externo (m)
qf          % Fluxo de calor (W/m²)
ro          % Densidade (kg/m³)
Cp          % Capacidade calorífica (J/kg°C)
k           % Condutividade térmica adotada (W/m°C)
R           % Espaço de confinamento da amostra (R=R2-R1) (m)
```

m % número de divisões no espaço de confinamento (R)
 Δr % Distância entre os pontos de medição ($\Delta r = R/p$)
 j % $j = 1 \dots m$
 r(j) % raio relacionado a cada ponto no espaço estudado (m);
 t_{total} % Tempo total do experimento (s)
 T_{∞} % Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
 fo % $fo = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right)$
 b % $b = (qf^* \Delta r) / k$ ($^{\circ}C$)
 TE % Dados experimentais de temperatura ($^{\circ}C$)

% Determinação de Δt (intervalo de medição) em função do critério de estabilidade

$$\Delta t = (\Delta r^2 \rho C_p) / 2k$$

% Determinação de p (número de pontos ao longo do tempo total)

$$p = \Delta t / t_{total}$$

% Determinação de i

$$i = 1 \dots p$$

% Determinação de T(i, j)

Para i=1

Para j=1:m

Faça T(i, j) = T_{∞}

Fim

Fim

Para i=2:p

Faça

Para j=2:m-1

$$\text{Faça } T(i, j) = fo(1 - \Delta r/r(j))T(i-1, j-1) + (fo(-2 + \Delta r/r(j)) + 1)T(i-1, j) + foT(i-1, j+1)$$

Fim

Para j=1

```

                Faça T(i,j)=T(i, j+1)+b
            Fim
        Para j=m
            Faça T(i,j)=T(i, j-1)
        Fim
    Fim

```

Saída de dados: T(i, j)

% Determinação de RE (Resíduo)

$$RE = \sum |T(i, j) - TE(i, j)|$$

Através do algoritmo, determina-se o k que gera menor resíduo entre os dados experimentais e os numéricos.

4.6.4 Análise dos resultados

Para o estudo do melhor valor da condutividade térmica obtido numericamente, é necessário determinar o menor resíduo gerado entre a equação de ajuste dos dados experimentais e a equação de ajuste dos dados numéricos para a condutividade.

Para cada tempo em que foram obtidos os dados experimentais, é calculado o valor numérico pela equação de ajuste numérico. O resíduo gerado é dado pela somatória da diferença entre o dado experimental e o dado numérico em cada tempo, elevado ao quadrado. Dessa somatória é retirada a raiz quadrada e tem-se o resíduo (BOLDRINI, 1984).

V RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização física

A soja utilizada nos experimentos era inteira e foi caracterizada fisicamente em função do seu conteúdo de umidade (em base seca e úmida), densidade real e densidade aparente.

5.1.1 Conteúdo de umidade

Para a determinação do conteúdo de umidade, as amostras foram colocadas em estufa de convecção forçada a 103°C por 72 horas. Os resultados obtidos de umidade em base úmida (Ubu) e em base seca (Ubs) estão na tabela 1:

Tabela 1: Determinação de umidade (em base seca e em base úmida)

Amostra	peso inicial(g)	peso final(g)	Ubs(%)	Ubu(%)
1	5,1210	4,6343	10,50	9,50
2	5,0412	4,5686	10,34	9,37
3	5,0362	4,5550	10,56	9,55
4	5,0974	4,6167	10,41	9,43
5	4,0565	3,6696	10,54	9,54
Média			10,47	9,48
Desvio Padrão			0,09	0,08

O material biológico analisado (soja) possui um baixo teor de umidade: 10,47% em base seca e 9,48% em base úmida.

5.1.2 Densidade real

Para a determinação da densidade real utilizou-se o método picnométrico. Os resultados obtidos de densidade real estão na tabela 2:

Tabela 2: Determinação da densidade real

Amostra	Massa(g)	Volume Inicial(ml)	Volume Final(ml)	Densidade Real(kg/m³)
1	75,04	150	213	1191
2	75,02	150	214	1172
3	75,11	150	214	1174
4	75,02	150	214	1172
5	75,01	150	213	1191
Média				1180
Desvio Padrão				10

A densidade real obtida para a soja, 1180kg/m³ está próxima ao encontrado na literatura: 1170kg/m³ em NUNES (2000) para soja inteira e seca.

5.1.3 Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente utilizou-se o método descrito em BENEDETTI (1987). Os resultados obtidos de densidade aparente estão na tabela 3:

Tabela 3: Determinação da densidade aparente

Amostra	Massa(g)	Volume(ml)	Densidade Aparente(kg/m³)
1	1079,10	1420	759,9
2	1080,24	1420	760,7
3	1079,10	1420	759,9
4	1078,04	1420	759,2
5	1077,89	1420	759,1
Média			759,8
Desvio Padrão			7,0

A densidade aparente obtida para a soja de 759,8kg/m³ está próxima ao encontrado na literatura para soja inteira e seca: 710kg/m³ em NUNES (2000).

5.2 Regime permanente

Nos experimentos realizados, variou-se a voltagem de aquecimento das extremidades de zero, isto é, sem aquecimento, a 0,7V em cada uma das extremidades. A altura dos termopares também foi variada. Cada combinação do aquecimento das extremidades e altura dos termopares gerou um conjunto de dados experimentais de temperatura para os 4 termopares TER1, TER2, TER3 e TER4.

Para o cálculo da condutividade térmica em regime permanente, considerou-se como valor de equilíbrio no experimento, o último valor de temperatura lida nos termopares (isto é, ao final das 4h de duração do experimento).

A tabela 4 apresenta a voltagem aplicada no aquecimento das extremidades e a altura dos termopares em função da última leitura dos termopares nos experimentos realizados:

Tabela 4: Temperatura final em cada termopar para os experimentos realizados

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	TER1 (°C)	TER2 (°C)	TER3 (°C)	TER4 (°C)
0,00	H5	63,6	51,2	43,4	34,6
0,00	H6	64,1	50,0	41,8	33,5
0,00	H7	63,5	51,3	43,7	33,8
0,25	H5	65,7	51,8	45,3	35,7
0,25	H6	65,8	54,0	47,3	35,5
0,25	H7	67,1	52,9	43,9	34,1
0,30	H5	70,9	57	46,8	35,4
0,30	H6	69,9	55,7	46,1	35,8
0,30	H7	72,2	57	47,9	36
0,40	H5	65,7	51,8	45,3	35,7
0,40	H6	65,4	49,1	42,2	34,1
0,40	H7	67,1	50,8	42,4	33,3
0,70	H5	71,0	52,3	44,9	35,4
0,70	H6	68,5	50,5	42,3	32,5
0,70	H7	62,4	47,8	40,7	32,5

5.2.1 Condutividade térmica

Utilizou-se a equação 1 para o cálculo da condutividade térmica em regime permanente. A condutividade térmica foi calculada pelo diferencial de temperatura entre os termopares (TER1, TER2, TER3 e TER4) para cada conjunto de dados experimentais. Estes foram apresentados nas tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 de acordo com a voltagem aplicada para o aquecimento das extremidades.

A tabela 5 mostra os resultados obtidos no cálculo da condutividade térmica para as amostras sem aquecimento nas extremidades, para três alturas de colocação dos termopares e utilizando a temperatura final dos termopares indicados.

Tabela 5: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, sem aquecimento nas extremidades

Altura dos termopares	Condutividade Térmica(W/m°C) entre os termopares indicados					
	TER1-TER2	TER1-TER3	TER1-TER4	TER2-TER3	TER2-TER4	TER3-TER4
H5	0,217	0,220	0,234	0,225	0,247	0,266
H6	0,191	0,199	0,222	0,214	0,248	0,282
H7	0,221	0,225	0,229	0,231	0,234	0,237

A tabela 5 mostra a tendência dos valores de condutividade térmica aumentarem à medida que os termopares considerados no cálculo se afastam do aquecimento central. O ambiente externo pode ter influenciado na condutividade térmica já que o sistema não é perfeitamente isolado.

Entre as alturas de colocação dos termopares não há grandes diferenças entre os valores obtidos de condutividade térmica.

A tabela 6 mostra os resultados obtidos no cálculo da condutividade térmica para as amostras com 0,25V de aquecimento nas extremidades, para três alturas de colocação dos termopares e utilizando a temperatura final dos termopares indicados.

Tabela 6: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,25V de aquecimento nas extremidades

Altura dos termopares	Condutividade Térmica(W/m°C) entre os termopares indicados					
	TER1-TER2	TER1-TER3	TER1-TER4	TER2-TER3	TER2-TER4	TER3-TER4
H5	0,194	0,218	0,226	0,270	0,255	0,244
H6	0,228	0,240	0,224	0,262	0,222	0,199
H7	0,190	0,192	0,206	0,195	0,218	0,239

Para o conjunto de dados da tabela 6, continua a tendência dos valores de condutividade térmica aumentarem à medida que os termopares considerados no cálculo se afastam do aquecimento central como discutido na tabela 5. Para a altura do termopar H6, os valores de condutividade térmica não apresentam essa tendência.

Porém, entre as alturas de colocação dos termopares já existe valores que apresentam uma diferença considerável entre si. Como há o aquecimento das extremidades, há um fluxo de calor na direção axial, o que pode ter causado essa perturbação.

A tabela 7 mostra os resultados obtidos no cálculo da condutividade térmica para as amostras com 0,30V de aquecimento nas extremidades, para três alturas de colocação dos termopares e utilizando a temperatura final dos termopares indicados.

Tabela 7: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,30V de aquecimento nas extremidades

Altura dos termopares	Condutividade Térmica(W/m°C) entre os termopares indicados					
	TER1-TER2	TER1-TER3	TER1-TER4	TER2-TER3	TER2-TER4	TER3-TER4
H5	0,194	0,185	0,191	0,172	0,190	0,206
H6	0,190	0,187	0,199	0,183	0,206	0,228
H7	0,177	0,183	0,188	0,193	0,195	0,197

Para o conjunto de dados da tabela 7, continua a tendência dos valores de condutividade térmica aumentarem à medida que os termopares considerados no cálculo se afastam do aquecimento central.

Entre as alturas de colocação dos termopares existem alguns valores que apresentam uma diferença considerável entre si. Porém, não são muitos os valores discrepantes.

A tabela 8 mostra os resultados obtidos no cálculo da condutividade térmica para as amostras com 0,40V de aquecimento nas extremidades, para três alturas de colocação dos termopares e utilizando a temperatura final dos termopares indicados.

Tabela 8: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,40V aquecimento nas extremidades

Altura dos termopares	Condutividade Térmica(W/m°C) entre os termopares indicados					
	TER1-TER2	TER1-TER3	TER1-TER4	TER2-TER3	TER2-TER4	TER3-TER4
H5	0,194	0,218	0,226	0,270	0,255	0,244
H6	0,165	0,192	0,217	0,254	0,273	0,289
H7	0,165	0,180	0,201	0,209	0,234	0,258

Para o conjunto de dados da tabela 8, continua a tendência dos valores de condutividade térmica aumentarem à medida que os termopares considerados no cálculo se afastam do aquecimento central. Porém, nessa tabela 8, esse aumento é mais acentuado que nos outros conjuntos de dados.

Entre as alturas de colocação dos termopares existem alguns valores que apresentam uma diferença considerável entre si. Como há o aquecimento nas extremidades, há um fluxo de calor na direção axial que pode ter causado essa perturbação.

A tabela 9 mostra os resultados obtidos no cálculo da condutividade térmica para as amostras com 0,70V de aquecimento nas extremidades, para três alturas de colocação dos termopares e utilizando a temperatura final dos termopares indicados:

Tabela 9: Condutividade térmica para as 3 alturas e entre os termopares indicados, considerando 0,70V aquecimento nas extremidades

Altura dos termopares	Condutividade Térmica(W/m°C) entre os termopares indicados					
	TER1-TER2	TER1-TER3	TER1-TER4	TER2-TER3	TER2-TER4	TER3-TER4
H5	0,144	0,170	0,191	0,237	0,243	0,247
H6	0,150	0,170	0,189	0,214	0,228	0,239
H7	0,184	0,205	0,227	0,247	0,268	0,286

Para o conjunto de dados da tabela 9, continua a tendência dos valores de condutividade térmica aumentarem à medida que os termopares considerados no cálculo se afastam do aquecimento central. Assim como na tabela 8, esse aumento é mais acentuado que nos outros de dados mostrados na tabela 5, 6 e 7.

Entre as alturas de colocação dos termopares existem alguns valores que apresentam uma diferença considerável entre si. Como há o aquecimento nas extremidades, há um fluxo de calor na direção axial que pode ter causado essa perturbação.

5.2.1.1 Condutividade térmica média

A condutividade térmica média e o desvio padrão foram calculados entre as condutividades térmicas obtidas para os termopares indicados (TER1-TER2, TER1-TER3, TER1-TER4, TER2-TER3, TER2-TER4 e TER3-TER4) para cada altura dos termopares e aquecimento nas extremidades.

Isso foi feito para se obter um valor de condutividade global em cada experimento. Além disso, o desvio padrão quantifica a diferença existente entre os valores das condutividades calculadas, para um mesmo experimento.

Analisando as tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 verifica-se que a condutividade varia ao longo da amostra, tanto na direção axial quanto na radial. Para quantificar a variação radial, construiu-se a tabela 10 que contém a condutividade média e o

desvio padrão, calculados para cada combinação do aquecimento das extremidades com a altura dos termopares.

Tabela 10: Condutividade média e desvio padrão para os diferentes aquecimentos axiais e as diferentes alturas dos termopares

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	Condutividade média (W/m°C)	Desvio Padrão
0,00	H5	0,235	0,019
0,00	H6	0,226	0,034
0,00	H7	0,229	0,006
0,25	H5	0,234	0,027
0,25	H6	0,229	0,021
0,25	H7	0,207	0,019
0,30	H5	0,189	0,011
0,30	H6	0,199	0,016
0,30	H7	0,189	0,008
0,40	H5	0,234	0,027
0,40	H6	0,232	0,049
0,40	H7	0,208	0,034
0,70	H5	0,205	0,043
0,70	H6	0,198	0,035
0,70	H7	0,236	0,038

Verifica-se pela tabela 10 que o aquecimento de 0,30V gera os menores desvios padrões entre os valores de condutividade obtidos para cada combinação de aquecimento das extremidades.

Os valores médios de condutividade térmica são próximos entre si para o conjunto de dados de aquecimento de 0,30V e para sem aquecimento. Para os outros conjuntos de dados, os valores obtidos de condutividade térmica são variáveis.

O menor desvio padrão é apresentado pelos termopares instalados no plano central (H7), nos experimentos de 0,0, 0,25 e 0,30V de aquecimento laterais. A não

observância deste fato para 0,40 e 0,70V pode indicar a influência do aquecimento axial inclusive ao plano central.

Os valores de condutividade térmica obtidos neste trabalho variaram de 0,189 a 0,236 W/m°C. DESHPANDE, BAL e OJHA (1996) encontraram para a soja, valores de condutividade entre 0,1157 e 0,1756 W/m°C. NUNES (2000) encontrou valores entre 0,07 e 0,13 W/m°C. A diferença entre estes valores pode ser explicada pela diferença na porosidade da amostra utilizada na determinação da condutividade, além das diferentes metodologias de determinação utilizadas.

5.2.2 Difusividade térmica

5.2.2.1 Difusividade térmica média

A tabela 11 mostra os resultados obtidos do cálculo da difusividade térmica, utilizando a equação 2 e os dados de condutividade térmica média, para as amostras. Esta equação relaciona a difusividade térmica diretamente com a condutividade térmica, encontrada anteriormente. Portanto a discussão dos resultados obtidos para a difusividade térmica é idêntica a discussão feita para a condutividade térmica.

Tabela 11: Difusividade média e desvio padrão para os diferentes aquecimentos e para as diferentes alturas dos termopares

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	Difusividade média (m ² /s)	Desvio Padrão
0,00	H5	10,10E-08	0,81E-08
0,00	H6	9,72E-08	1,46E-08
0,00	H7	9,85E-08	0,26E-08
0,25	H5	10,11E-08	1,18E-08
0,25	H6	9,85E-08	0,91E-08
0,25	H7	8,90E-08	0,82E-08
0,30	H5	8,13E-08	0,47E-08
0,30	H6	8,56E-08	0,71E-08
0,30	H7	8,13E-08	0,33E-08
0,40	H5	10,09E-08	1,18E-08
0,40	H6	9,98E-08	2,09E-08
0,40	H7	8,95E-08	1,47E-08
0,70	H5	8,82E-08	1,86E-08
0,70	H6	8,52E-08	1,50E-08
0,70	H7	10,20E-08	1,65E-08

Os valores de difusividade térmica obtidos variaram de $8,13 \times 10^{-8}$ a $10,20 \times 10^{-8}$ m²/s. DESHPANDE, BAL e OJHA (1996) encontraram para a soja, valores de difusividade entre $8,17 \times 10^{-8}$ m²/s a $8,53 \times 10^{-8}$ m²/s. NUNES (2000) encontrou valores entre $2,90 \times 10^{-8}$ m²/s a $4,46 \times 10^{-8}$ m²/s. A diferença entre estes valores pode ser explicada pela diferença na porosidade da amostra utilizada na determinação da condutividade, além das diferentes metodologias de determinação utilizadas.

5.3 Método numérico

O método numérico foi utilizado para determinar somente a condutividade térmica já que a difusividade térmica pode ser determinada utilizando a equação 2.

Para a determinação da condutividade térmica, utilizando o método numérico, os seguintes parâmetros são utilizados:

$$q_f \text{ (fluxo de calor)} = 393,7\text{W/m}^2$$

$$\rho \text{ (densidade)} = 1180\text{kg/m}^3$$

$$C_p \text{ (capacidade calorífica)} = 1970\text{J/kg}^\circ\text{C}$$

$$R_1 \text{ (raio interno)} = 0,013\text{m}$$

$$R_2 \text{ (raio externo)} = 0,049\text{m}$$

O tempo total considerado é de 6100s, em intervalos de 100 em 100s, uma vez que neste intervalo de tempo atinge-se a região assíntota da curva experimental.

Considerando os parâmetros fornecidos, inicialmente é necessário estudar a influência da malha para determinar o número de pontos de determinação (m) numérica. Com esse dado inicia-se a fase de simulação numérica. A condutividade térmica é determinada como sendo aquela que gera menor resíduo entre os dados experimentais e os numéricos.

5.3.1 Estudo da influência da malha

Para estudar a influência da malha na determinação da condutividade térmica numérica, considerou-se inicialmente uma divisão do espaço (R1,R2) em $N_p=4$ partes gerando $m=5$ pontos de determinação. Em seguida, fez-se $N_p/2$, $N_p/4$ e assim sucessivamente até $N_p=128$ e $m=129$. A malha não é mais refinada devido ao aumento excessivo do tempo computacional gasto.

Para cada valor de m, tem-se valor de $\Delta r (= (R_2 - R_1) / m)$ correspondente e a partir do qual pode-se determinar o valor de Δt considerando-se o critério mínimo de estabilidade ($2\alpha(\Delta t / \Delta r^2) \leq 1$).

Para verificar qual valor de Δr a partir do qual não há alteração significativa dos resultados, foi selecionado um dos pontos de determinação que é o $r=0,022m$. Os demais parâmetros (q_f (fluxo de calor), ρ (densidade), C_p (capacidade calorífica, k (condutividade térmica) e tempo total do experimento) são fixos.

Os resultados obtidos do estudo da influência da malha variando-se m de 5 até 129 encontram-se na figura 4:

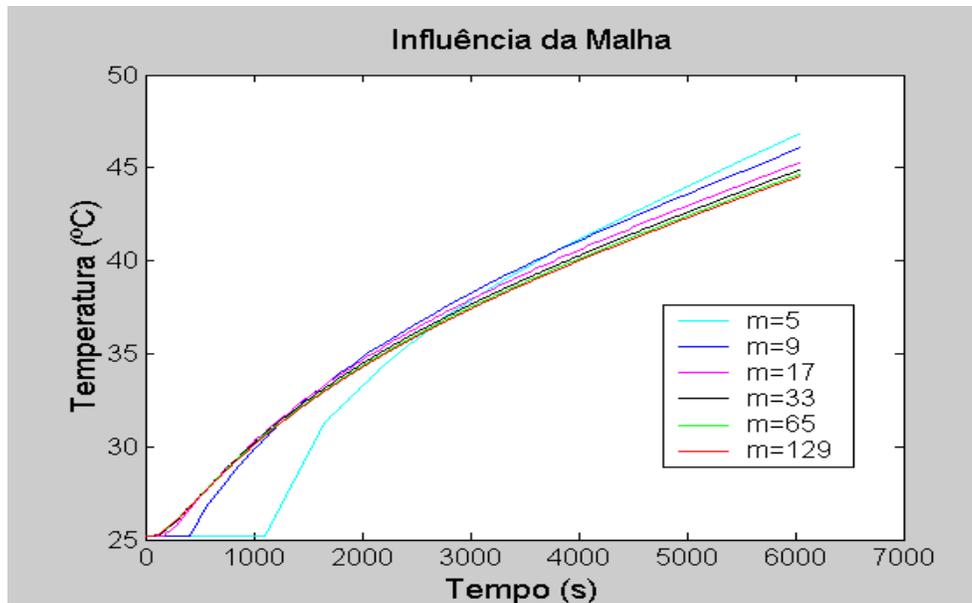


Figura 4: Curvas de temperatura em relação ao tempo variando-se m

Verifica-se pela figura 4 a influência do tamanho da malha nos resultados das simulações numéricas. Para as malhas com $m=65$ e $m=129$ pontos de determinação, as curvas estão praticamente sobrepostas e, como aumentando a malha aumenta-se muito o tempo computacional gasto (cerca de vinte vezes a mais), utilizou-se para as simulações numéricas que seguem $m=65$ que consomem cerca de 30 segundos.

Após a determinação do Δr , inicia-se a fase de determinação numérica da condutividade térmica.

5.3.2 Determinação da condutividade térmica

Para determinar numericamente o melhor valor da condutividade térmica foi feito um estudo do resíduo gerado pelos resultados numéricos em relação aos dados experimentais. Para esse estudo, variou-se a k com os demais parâmetros fixos (q_f (fluxo de calor), ρ (densidade), C_p (capacidade calorífica e tempo total do experimento)).

Considerou-se como valor de referência $k=0,13\text{W/m}^\circ\text{C}$, correspondente à umidade de 12% (base seca), obtido de DESHPANDE, BAL E OJHA (1996). A partir deste valor, determinou-se um intervalo onde o valor da condutividade térmica apresentasse o menor resíduo. Com esse intervalo, o valor da condutividade variou de 0,001 em 0,001 para a determinação da condutividade que gera o menor resíduo. Considerou-se o valor limite de $k=0,53\text{W/m}^\circ\text{C}$ para as simulações já que esse foi o maior valor para grãos relatado na literatura.

Foi determinado o valor da condutividade térmica numérica para os dados experimentais obtidos em cada um dos 4 termopares de cada conjunto de dados experimentais, caracterizado pelo aquecimento nas extremidades e altura dos termopares. O resíduo foi determinado conforme descrito em 4.6.4.

A seguir, apresenta-se o conjunto de dados de altura H5 e sem aquecimento nas extremidades e posteriormente apresentam-se os outros conjuntos de dados.

Para estes, o procedimento para a determinação numérica do valor da condutividade térmica é idêntico ao apresentado para o conjunto de dados sem aquecimento nas extremidades e altura H5. Portanto, para os demais conjuntos de dados mostra-se somente os valores da condutividade térmica obtida.

5.3.2.1 Conjunto de dados: aquecimento= 0V; altura= H5

Para o conjunto de dados onde não há aquecimento nas extremidades e a altura de determinação é H5, detalhou-se a obtenção da condutividade térmica

através do método numérico. A temperatura inicial é 23,5°C para H5 sem aquecimento nas extremidades.

5.3.2.1.1 Termopar 1

Para os dados experimentais do termopar 1 (TER1), inicialmente determinou-se um intervalo de valores de condutividade térmica onde estaria o menor resíduo. Na tabela (12) estão mostrados alguns valores de condutividade térmica e os respectivos resíduos gerados.

Tabela 12: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER1

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,130	68,911
0,150	48,558
0,170	33,459
0,190	23,534
0,205	20,090
0,210	19,761
0,215	19,807
0,230	21,708

Pela tabela 12 observa-se que a condutividade térmica que gera menor resíduo está entre 0,205 e 0,215W/m°C. Sendo assim, com maior precisão, a partir desses dois valores, a condutividade foi variada de 0,001 em 0,001 e determinou-se a condutividade que gera o menor resíduo. A tabela 13 mostra os resíduos gerados com esta nova variação da condutividade:

Tabela 13: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER1

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,205	20,090
0,206	19,993
0,207	19,911
0,208	19,845
0,209	19,796
0,210	19,761
0,211	19,742
0,212	19,737
0,213	19,746
0,214	19,770
0,215	19,807

A condutividade térmica com menor resíduo é a 0,212W/m°C e o resíduo é de 19,737°C para TER1 e altura H5 sem aquecimento.

A figura 5 foi construída a partir dos valores das tabelas 12 e 13.

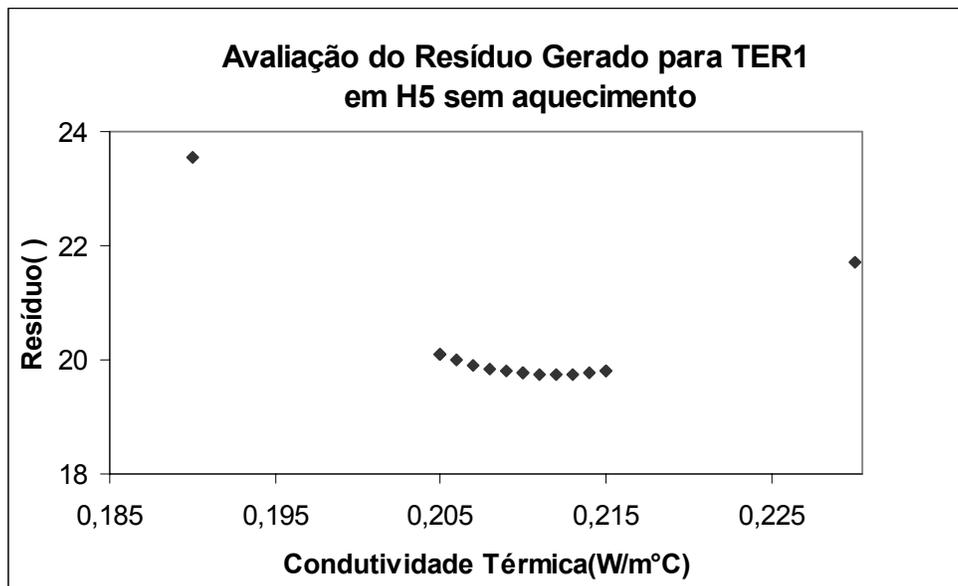


Figura 5: Resíduo gerado em função da condutividade térmica de TER1 em H5 sem aquecimento

A figura 6 mostra os dados de temperatura experimentais e os numéricos calculados com $k=0,212\text{W/m}^\circ\text{C}$ para o ponto de determinação TER1. Apresentou-se uma curva contínua para os dados numéricos para facilitar a visualização.

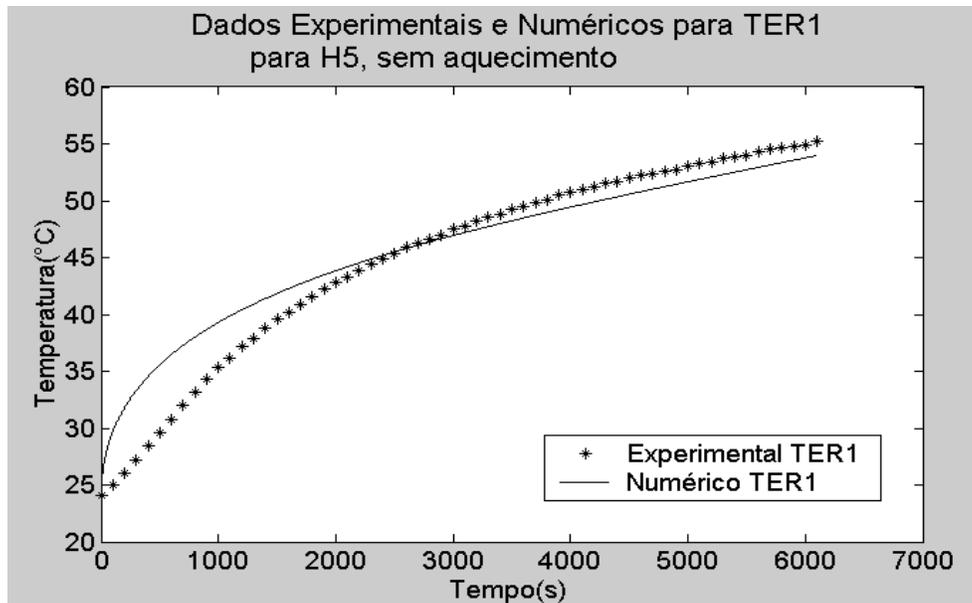


Figura 6: Dados experimentais e numéricos de TER1 em H5 sem aquecimento

A curva numérica e a experimental se cruzam mais ou menos no intervalo de dados correspondente à metade do experimento. Além disso, pode-se notar que do início até aproximadamente a metade do tempo observado, a temperatura aumenta mais rapidamente segundo o modelo numérico, o que se inverte a partir de então. Isso indica a necessidade de considerar a condutividade térmica variando durante o processo, isto é, função de temperatura.

Em todos os dados de TER1 para os próximos conjuntos de dados observa-se esse cruzamento da curva numérica com os dados experimentais. Portanto a discussão referente a esse fato, vale para todos os próximos dados de TER1 apresentados e não será mais mencionada.

5.3.2.1.2 Termopar 2

Para os dados experimentais do termopar 2 (TER2), inicialmente determinou-se um intervalo do valor da condutividade térmica onde estaria o menor

resíduo. Na tabela (14) estão mostrados alguns valores de condutividade térmica e os respectivos resíduos gerados.

Tabela 14: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER2 em H5 sem aquecimento

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,130	10,451
0,150	6,210
0,170	3,881
0,175	3,815
0,180	3,972
0,190	4,764

Pela tabela 14 observa-se que a condutividade térmica que gera menor resíduo está entre 0,170 e 0,180W/m°C. Sendo assim, com maior precisão, a partir desses dois valores, a condutividade foi variada de 0,001 em 0,001 e determinou-se a condutividade que gera o menor resíduo. A tabela 15 mostra os resíduos gerados com esta nova variação da condutividade:

Tabela 15: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER2 em H5 sem aquecimento

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,170	3,881
0,171	3,849
0,172	3,826
0,173	3,813
0,174	3,810
0,175	3,815
0,176	3,830
0,177	3,853
0,178	3,885
0,179	3,925
0,180	3,972

A condutividade térmica com menor resíduo é a 0,174W/m°C e o resíduo é de 3,810°C para TER2 e altura H5 sem aquecimento.

A figura 7 foi construída a partir dos valores das tabelas 14 e 15.

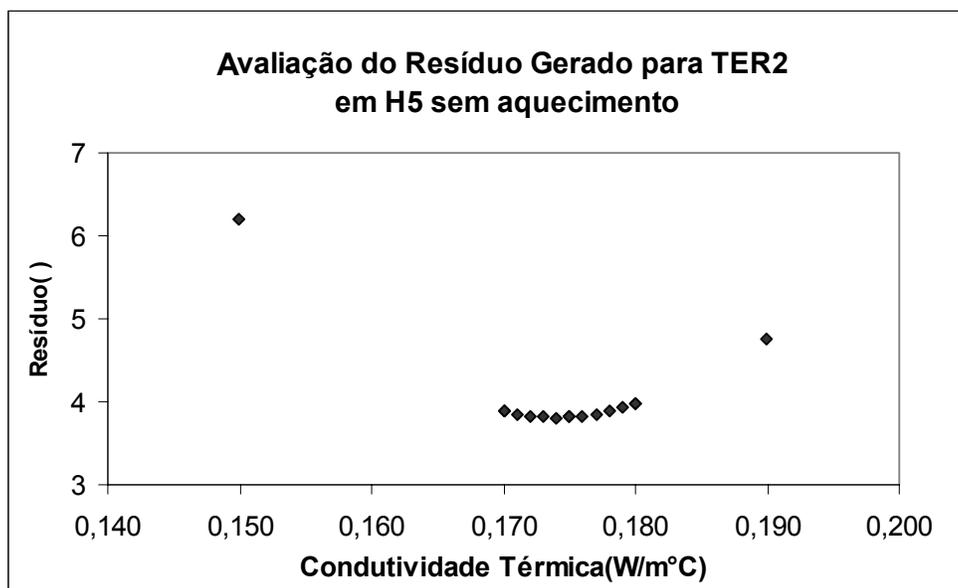


Figura 7: Resíduo gerado em relação a condutividade térmica de TER2 em H5 sem aquecimento.

A figura 8 mostra os dados de temperatura experimentais e os numéricos calculados com $k=0,174\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ para o ponto de determinação TER2. Nesta figura, apresenta-se uma curva contínua para os dados obtidos numericamente para facilitar a visualização.

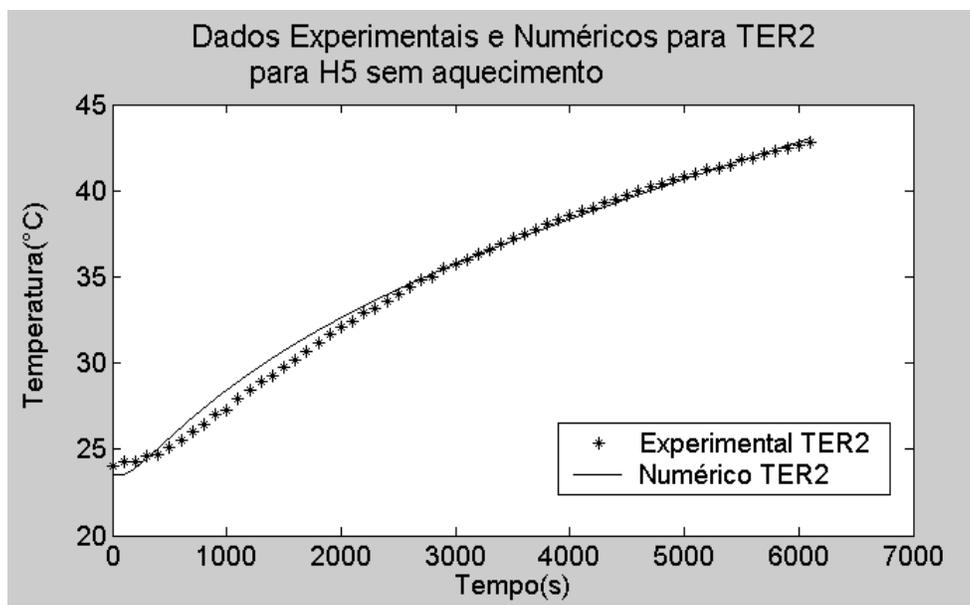


Figura 8: Dados experimentais e numéricos de TER2 em H5 sem aquecimento

Visualmente, a curva numérica acompanha bem os dados experimentais o que é confirmado pelo baixo resíduo gerado.

5.3.2.1.3 Termopar 3

Para os dados experimentais do termopar 3 (TER3), inicialmente determinou-se um intervalo do valor da condutividade térmica onde estaria o menor resíduo. Na tabela 16 estão mostrados alguns valores de condutividade térmica e os respectivos resíduos gerados.

Tabela 16: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER3 em H5 sem aquecimento

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,130	6,506
0,170	4,340
0,210	3,310
0,300	2,659
0,330	2,632
0,335	2,632
0,340	2,631
0,345	2,632
0,350	2,633

Pela tabela 16 observa-se que a condutividade térmica que gera menor resíduo está entre 0,335 e 0,345W/m°C. Sendo assim, com maior precisão, a partir desses dois valores, a condutividade foi variada de 0,001 em 0,001 e determinou-se a condutividade que gera o menor resíduo. A tabela 17 mostra os resíduos gerados com esta nova variação da condutividade:

Tabela 17: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER3 em H5 sem aquecimento

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,335	2,632
0,336	2,631
0,337	2,631
0,338	2,631
0,339	2,631
0,340	2,631
0,341	2,631
0,342	2,631
0,343	2,631
0,344	2,631
0,345	2,632

Devido ao resíduo obtido entre 0,336W/m°C e 0,344W/m°C ser o mesmo para todos os valores, escolheu-se a condutividade térmica de valor médio, isto é, $k=0,340\text{W/m}^\circ\text{C}$ e resíduo de $2,631^\circ\text{C}$ como sendo o melhor valor para TER3 e altura H5 sem aquecimento.

A figura 9 foi construída a partir dos valores das tabelas 16 e 17.

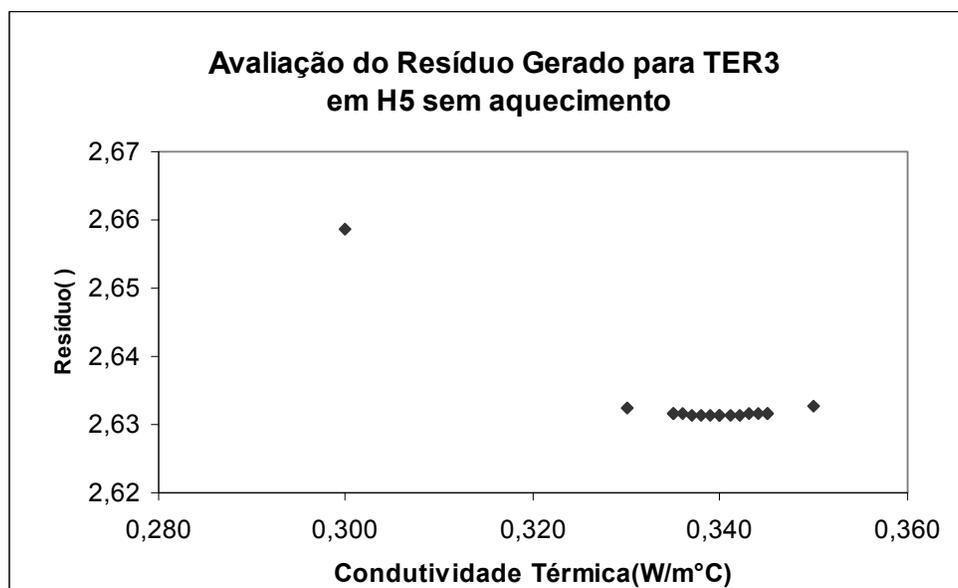


Figura 9: Resíduo gerado em relação a condutividade térmica de TER3 em H5 sem aquecimento

A figura 10 mostra os dados de temperatura experimentais e os numéricos calculados com $k=0,339\text{W}/^\circ\text{C}$ para o ponto de determinação TER3. Nesta figura, apresenta-se uma curva contínua para os dados obtidos numericamente para facilitar a visualização.

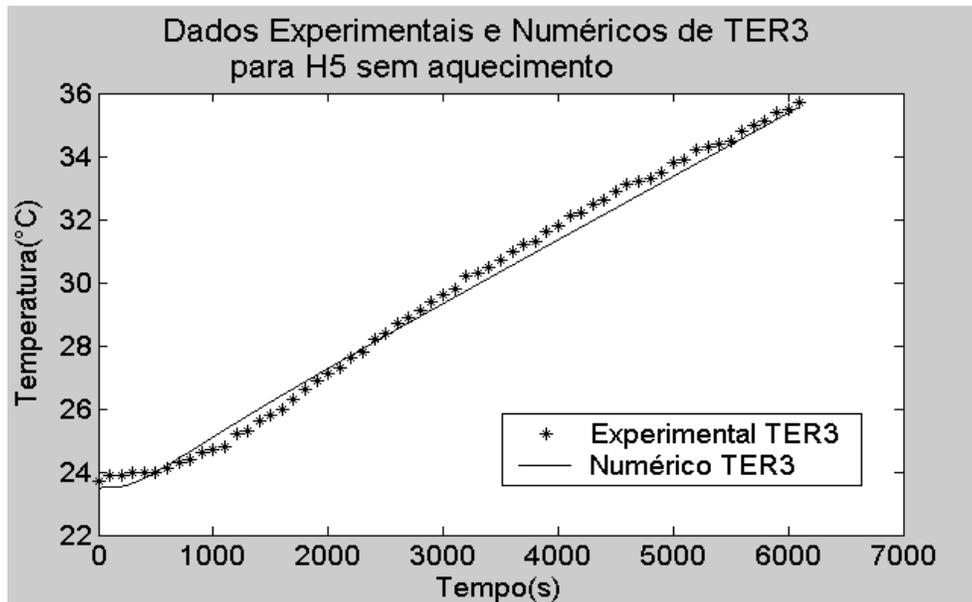


Figura 10: Dados experimentais e numéricos de TER3 em H5 sem aquecimento

Visualmente, a curva numérica acompanha bem os dados experimentais o que é confirmado pelo baixo resíduo gerado.

5.3.2.1.4 Termopar 4

Para os dados experimentais do termopar 4 (TER4), inicialmente determinou-se um intervalo do valor da condutividade térmica onde estaria o menor resíduo. Na tabela 18 estão mostrados alguns valores de condutividade térmica e os respectivos resíduos gerados:

Tabela 18: Determinação do intervalo de condutividade térmica que gera menor resíduo para TER4 em H5 sem aquecimento

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,120	4,108
0,130	3,238
0,135	3,102
0,140	3,184
0,150	3,842

Pela tabela 18 observa-se que a condutividade térmica que gera menor resíduo está entre 0,130 e 0,140W/m°C. Sendo assim, com maior precisão, a partir desses dois valores, a condutividade foi variada de 0,001 em 0,001 e determinou-se a condutividade que gera o menor resíduo. A tabela 19 mostra os resíduos gerados com esta nova variação da condutividade:

Tabela 19: Determinação da condutividade térmica que gera menor resíduo para TER4 em H5 sem aquecimento

Condutividade Térmica (W/m°C)	Resíduo(°C)
0,130	3,238
0,131	3,193
0,132	3,157
0,133	3,130
0,134	3,112
0,135	3,102
0,136	3,102
0,137	3,110
0,138	3,127
0,139	3,151
0,140	3,184

A condutividade térmica com menor resíduo é a 0,136W/m°C e o resíduo é de 3,102°C para TER4 e altura H5 sem aquecimento.

A figura 11 foi construída a partir dos valores das tabelas 18 e 19.

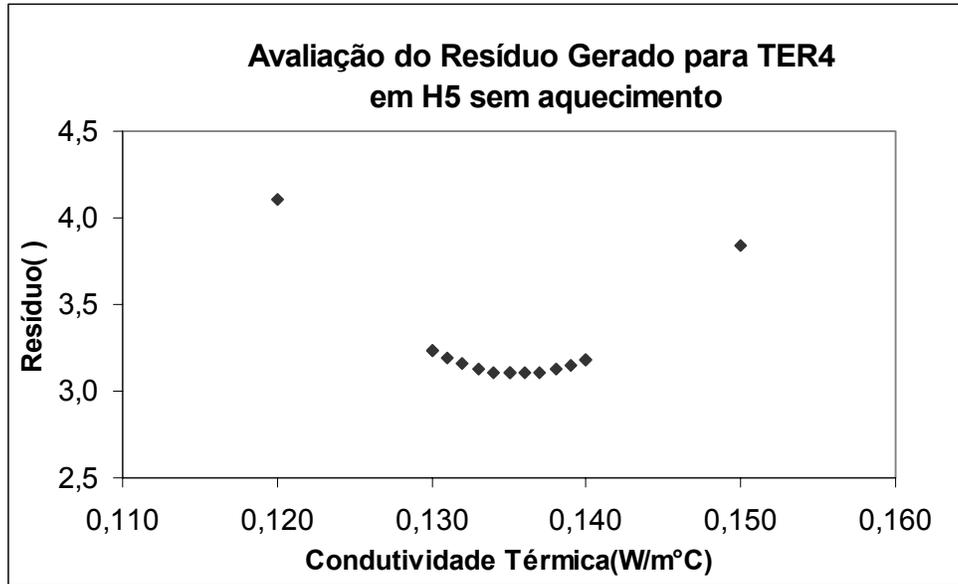


Figura 11: Resíduo gerado em relação a condutividade térmica de TER4 em H5 sem aquecimento

A figura 12 mostra os dados de temperatura experimentais e os numéricos calculados com $k=0,136\text{W/}^\circ\text{C}$ para o ponto de determinação TER4. Apresentou-se uma curva contínua para os dados numéricos para facilitar a visualização.

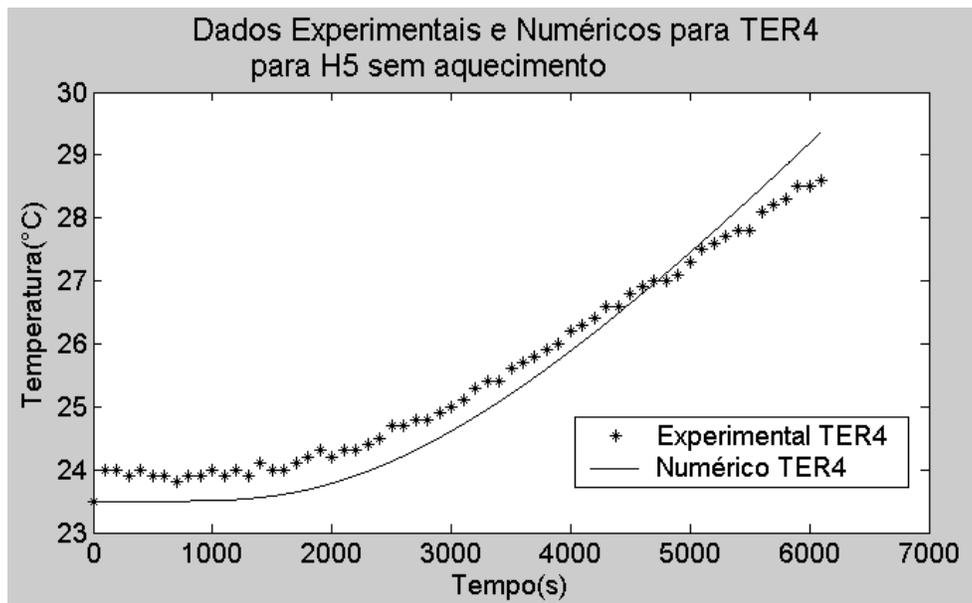


Figura 12: Dados experimentais e numéricos de TER4 em H5 sem aquecimento

Para estes dados o valor do resíduo gerado continua baixo.

5.3.2.1.5 Junção de todas as curvas experimentais e numéricas

A figura 13 mostra todas as curvas com dados experimentais e os calculados numericamente correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 de altura H5 e sem aquecimento para os melhores valores de k obtidos.

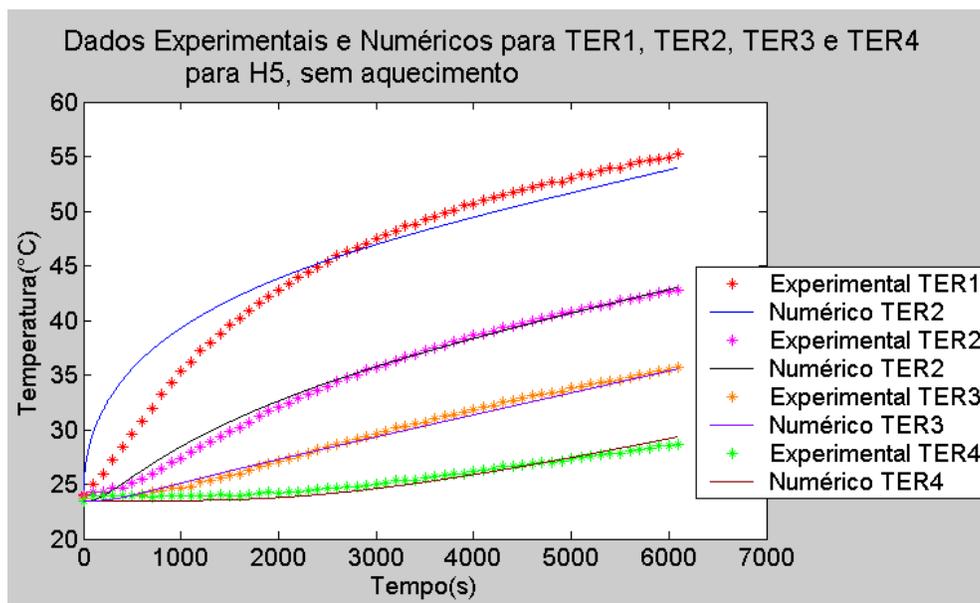


Figura 13: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 sem aquecimento

A tabela 20 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 20: Condutividade Térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 sem aquecimento

Posição de Determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,212	19,737
TER2	0,174	3,810
TER3	0,340	2,631
TER4	0,136	3,102

Visualmente, observa-se na figura 13, que para os dados de TER2, TER3 e TER4 as curvas numéricas e os dados experimentais estão próximos. O que pode ser confirmado pela tabela 20, onde os resíduos destes são baixos em comparação

ao de TER1. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2500s. O valor obtido de condutividade térmica para TER3 é muito mais elevado do que os outros valores obtidos. Este resultado pode ter ocorrido por exemplo, pelo desvio da posição de TER3.

Desconsiderando a posição TER3, observa-se que os valores obtidos de condutividade térmica tendem a diminuir à medida que o termopar de referência se afasta do aquecimento central, demonstrando a influência da temperatura nesta propriedade.

5.3.2.2 Conjunto de dados: aquecimento= 0V; altura= H6

Para o conjunto de dados onde não há aquecimento nas extremidades e a altura é H6, a temperatura inicial era de 23,5°C.

A figura 14 mostra as curvas dos dados experimentais e dos dados calculados numericamente correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H6 e nenhum aquecimento nas extremidades.

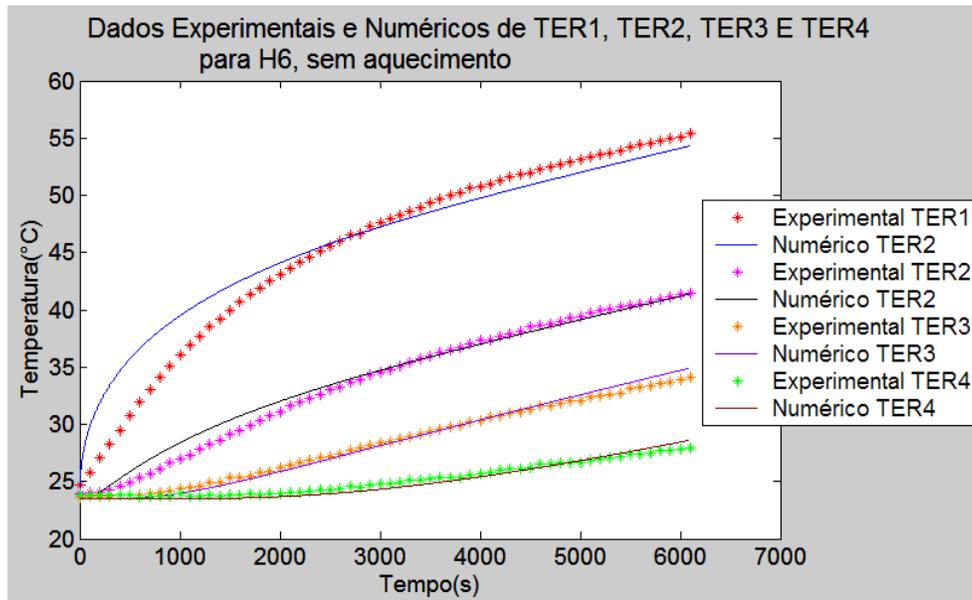


Figura 14: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, sem aquecimento

A tabela 21 mostra os valores de condutividade térmica obtidos numericamente e os resíduos gerados para as quatro posições de determinação para altura H6 e nenhum aquecimento nas extremidades:

Tabela 21: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 sem aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,208	16,722
TER2	0,228	5,376
TER3	0,104	2,901
TER4	0,118	2,538

Visualmente, observa-se na figura 14, que para os dados de TER2, TER3 e TER4 as curvas numéricas e os dados experimentais estão próximos. O que pode ser confirmado pela tabela 21.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, no início do experimento a curva numérica não está próxima aos dados experimentais gerando ainda um resíduo um pouco mais elevado do que para TER3 e TER4. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2800s.

Os valores obtidos de condutividade térmica em TER1 e TER2, próximos ao aquecimento central, são maiores que os obtidos para TER3 e TER4.

5.3.2.3 Conjunto de dados: aquecimento= 0V; altura= H7

Para o conjunto de dados onde não há aquecimento nas extremidades e a altura é H7, a temperatura inicial era de 23,1°C.

A figura 15 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H7 e nenhum aquecimento nas extremidades.

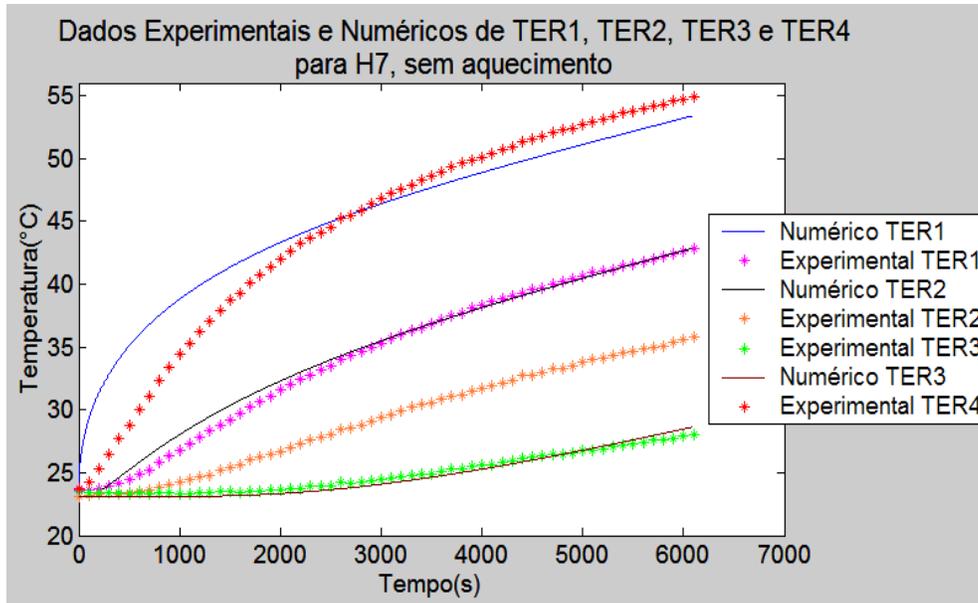


Figura 15: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, sem aquecimento

A tabela 22 mostra os resíduos gerados pelos dados obtidos numericamente em relação aos dados experimentais:

Tabela 22: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 sem aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,214	21,319
TER2	0,168	4,564
TER4	0,128	2,505

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica já que até o valor máximo adotado de 0,53W/m°C, o valor de condutividade térmica que gera o menor resíduo não foi encontrado.

Visualmente, observa-se na figura 15, que para os dados de TER2 e TER4 as curvas numéricas e os dados experimentais estão próximos. A tabela 22 confirma isso já que os resíduos de TER2 e TER4 são menores que para TER1.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, no início do experimento a curva numérica não está próxima aos dados experimentais gerando

ainda um resíduo um pouco mais elevado do que para TER4. Para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2800s.

Observa-se que os valores obtidos de condutividade térmica tendem a diminuir à medida que o termopar de referência se afasta do aquecimento central.

5.3.2.4 Conjunto de dados: aquecimento= 0,25V; altura= H5

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,25V e a altura é H5, a temperatura inicial era de 21,6°C.

A figura 16 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H5 e 0,25V de aquecimento nas extremidades.

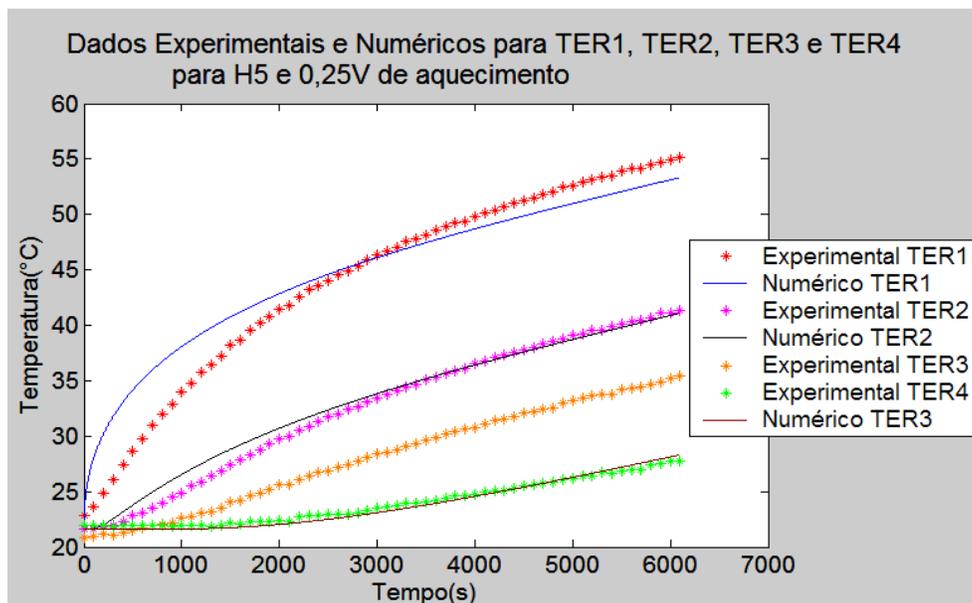


Figura 16: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,25V de aquecimento

A tabela 23 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 23: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,25V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,198	19,828
TER2	0,175	6,119
TER4	0,161	2,429

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica assim como foi relatado no conjunto de dados anterior (para TER3 em H7 sem aquecimento nas extremidades).

Visualmente, observa-se na figura 15, que para os dados de TER2 e TER4 as curvas numéricas e os dados experimentais estão próximos. A tabela 22 confirma isso já que o resíduo de TER2 e TER4 são menores que para TER1.

Observa-se que para os dados de TER2, no início do experimento a curva numérica não está próxima aos dados experimentais gerando ainda um resíduo um pouco mais elevado do que para TER4. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2800s.

Observa-se que os valores obtidos de condutividade térmica tendem a diminuir à medida que o termopar de referência se afasta do aquecimento central. Porém, essa tendência é menos acentuada que nos conjuntos de dados anteriores.

5.3.2.5 Conjunto de dados: aquecimento= 0,25V; altura= H6

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,25V e a altura é H6, a temperatura inicial era de 21,1°C.

A figura 17 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H6 e 0,25V aquecimento nas extremidades.

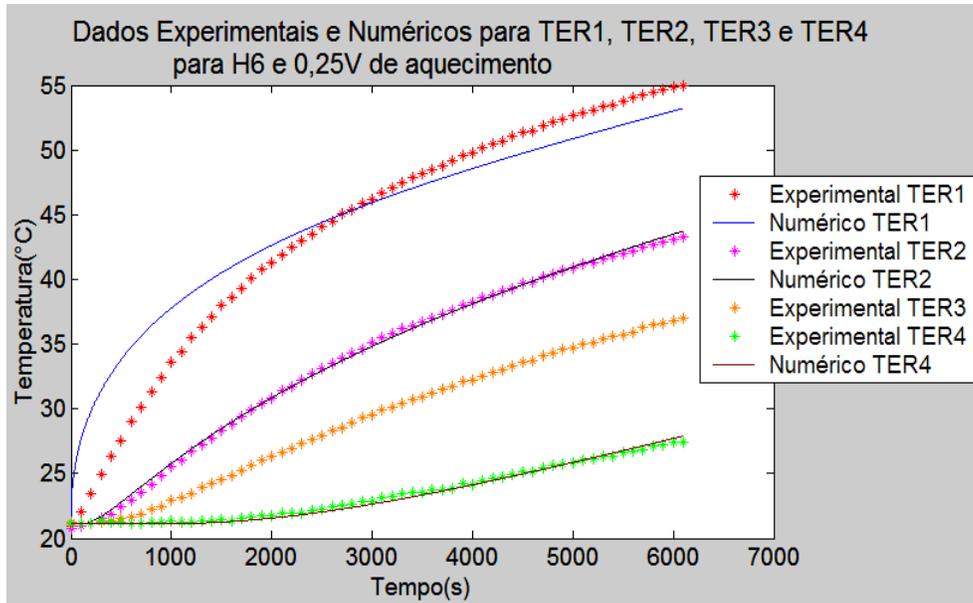


Figura 17: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,25V de aquecimento

A tabela 24 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 24: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,25V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,194	21,974
TER2	0,114	1,759
TER4	0,164	1,339

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica numericamente.

Visualmente, observa-se na figura 17, que para os dados de TER2 e TER4 as curvas numéricas e os dados experimentais estão próximos. Pela tabela 26, verifica-se que os resíduos de TER2 e TER4 são baixos em comparação aos dados de TER1.

Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2800s.

5.3.2.6 Conjunto de dados: aquecimento= 0,25V; altura= H7

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,25V e a altura é H7, a temperatura inicial era de 20,6°C.

A figura 18 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H7 e 0,25V de aquecimento nas extremidades.

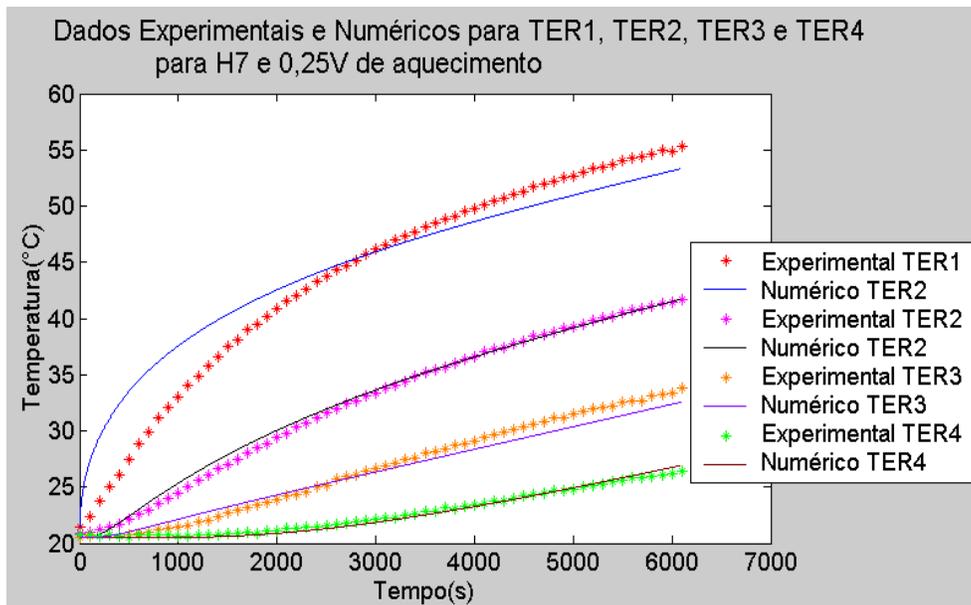


Figura 18: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,25V de aquecimento

A tabela 25 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 25: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,25V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,187	21,627
TER2	0,137	3,364
TER3	0,356	5,722
TER4	0,152	1,797

Visualmente, observa-se na figura 18, que para os dados de TER2, TER3 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1.

Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2800s. O valor obtido de condutividade térmica para TER3 é muito mais elevado do que os outros valores obtidos. Este resultado pode ter ocorrido por exemplo, pelo desvio da posição de TER3.

5.3.2.7 Conjunto de dados: aquecimento= 0,30V; altura= H5

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,30V e a altura é H5, a temperatura inicial era de 20,7°C.

A figura 19 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H5 e 0,30V de aquecimento nas extremidades.

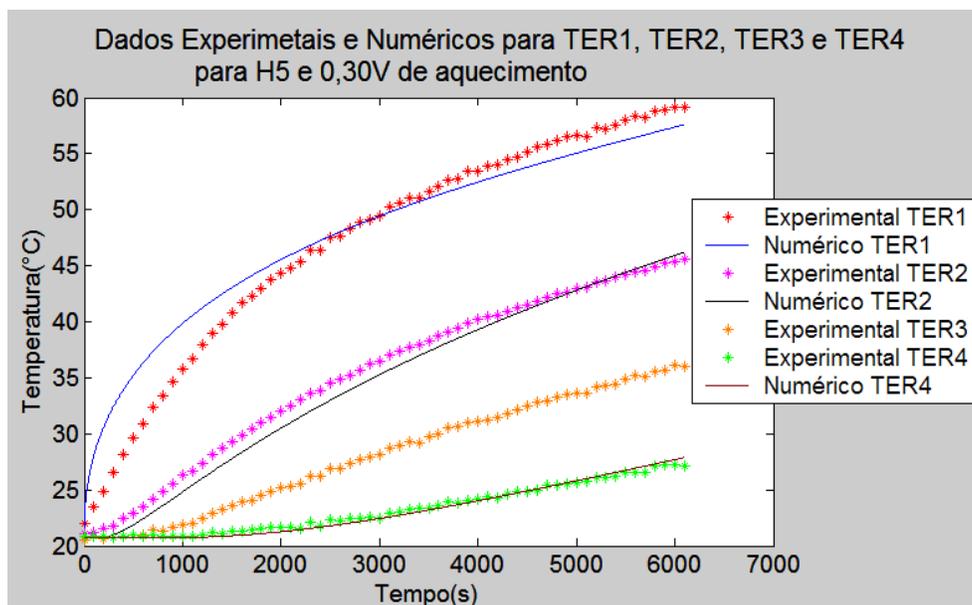


Figura 19: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,30V de aquecimento

A tabela 26 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 26: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,30V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,155	19,735
TER2	0,079	8,348
TER4	0,178	2,090

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica numericamente. Visualmente, observa-se na figura 19, que para os dados de TER4 as curvas numérica e experimental estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1 e TER2.

O valor obtido de condutividade térmica para TER2 é muito mais baixo do que os outros valores obtidos. Este resultado pode ter ocorrido por exemplo, pelo desvio da posição de TER2. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 2800s.

5.3.2.8 Conjunto de dados: aquecimento= 0,30V; altura= H6

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,30V e a altura é H6, a temperatura inicial era de 21,6°C.

A figura 20 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H6 e 0,30V de aquecimento nas extremidades.

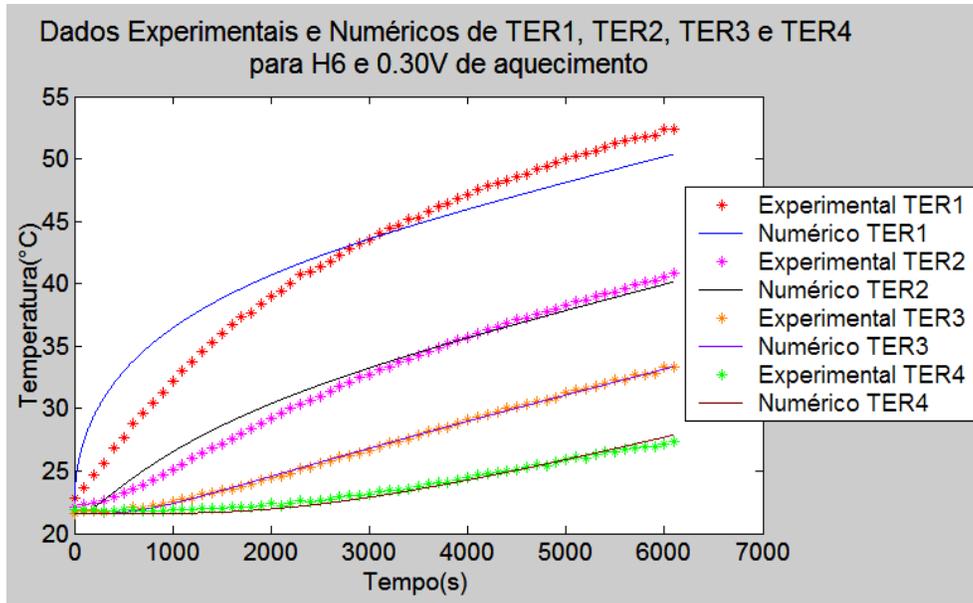


Figura 20: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,30V de aquecimento

A tabela 27 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 27: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,30V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,234	19,849
TER2	0,2030	6,227
TER3	0,144	0,794
TER4	0,148	2,098

Visualmente, observa-se na figura 20, que para os dados de TER3 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, a curva numérica não está tão próxima aos dados experimentais quanto para TER3 e TER4. Isso é confirmado pelo resíduo mais elevado.

Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

5.3.2.9 Conjunto de dados: aquecimento= 0,30V; altura= H7

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,30V e a altura é H7, a temperatura inicial era de 22,0°C.

A figura 21 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H7 e 0,30V de aquecimento nas extremidades.

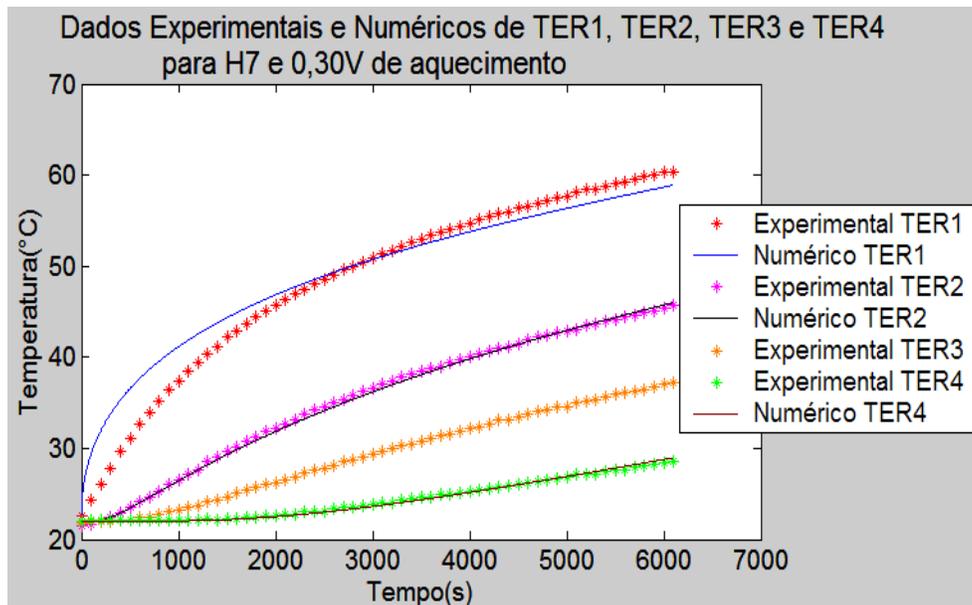


Figura 21: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,30V de aquecimento

A tabela 28 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 28: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,30V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
Ter1	0,155	19,151
Ter2	0,096	2,326
Ter4	0,170	1,378

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica numericamente.

Visualmente, observa-se na figura 21, que para os dados de TER2 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados TER1. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

5.3.2.10 Conjunto de dados: aquecimento= 0,40V; altura= H5

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,40V e a altura é H5, a temperatura inicial era de 21,8°C.

A figura 22 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H5 e 0,40V de aquecimento nas extremidades.

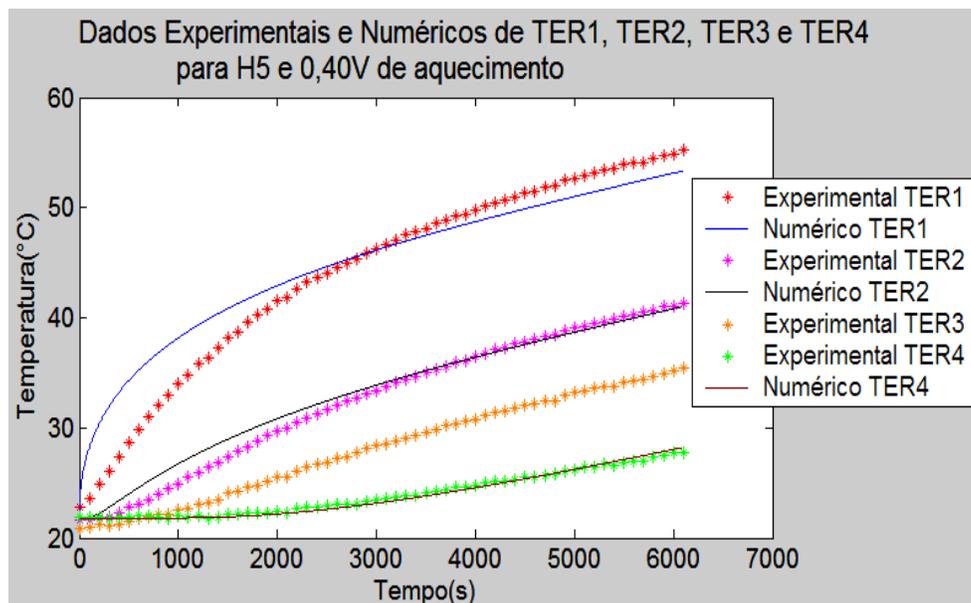


Figura 22: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,40V de aquecimento

A tabela 29 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 29: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,40V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,200	20,256
TER2	0,182	6,955
TER4	0,152	1,718

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica numericamente.

Visualmente, observa-se na figura 22, que para os dados de TER4 as curvas numérica e experimental estão próximas e o resíduo é baixo em relação a TER1.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, a curva numérica não está tão próxima aos dados experimentais quanto para TER4. Isso é confirmado pelo resíduo mais elevado.

Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

Observa-se que os valores obtidos de condutividade térmica tendem a diminuir à medida que o termopar de referência se afasta do aquecimento central.

5.3.2.11 Conjunto de dados: aquecimento= 0,40V; altura= H6

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,40V e a altura é H6, a temperatura inicial era de 21,9°C.

A figura 23 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H6 e 0,40V de aquecimento nas extremidades.

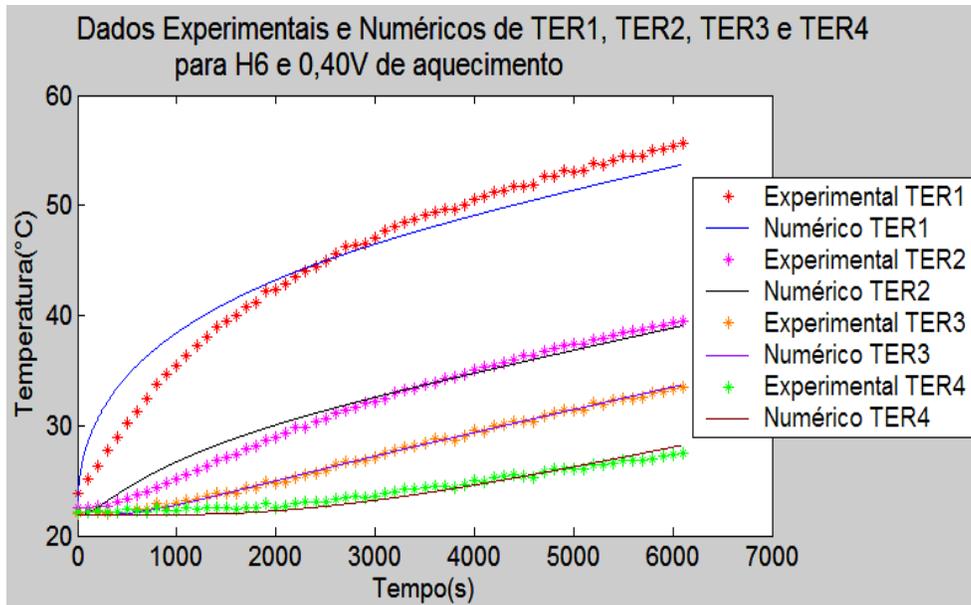


Figura 23: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,40V de aquecimento

A tabela 30 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 30: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,40V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
Ter1	0,197	19,271
Ter2	0,262	6,405
Ter3	0,156	0,904
Ter4	0,149	3,369

Visualmente, observa-se na figura 23, que para os dados de TER3 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, a curva numérica não está tão próxima aos dados experimentais quanto para TER3 e TER4. Isso é confirmado pelo resíduo mais elevado.

O valor obtido de condutividade térmica para TER2 é mais elevado do que os outros valores obtidos. Este resultado pode ter ocorrido por exemplo, pelo desvio da posição de TER2.

Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

5.3.2.12 Conjunto de dados: aquecimento= 0,40V; altura= H7

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,40V e a altura é H7, a temperatura inicial era de 19,6°C.

A figura 24 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H7 e 0,40V de aquecimento nas extremidades.

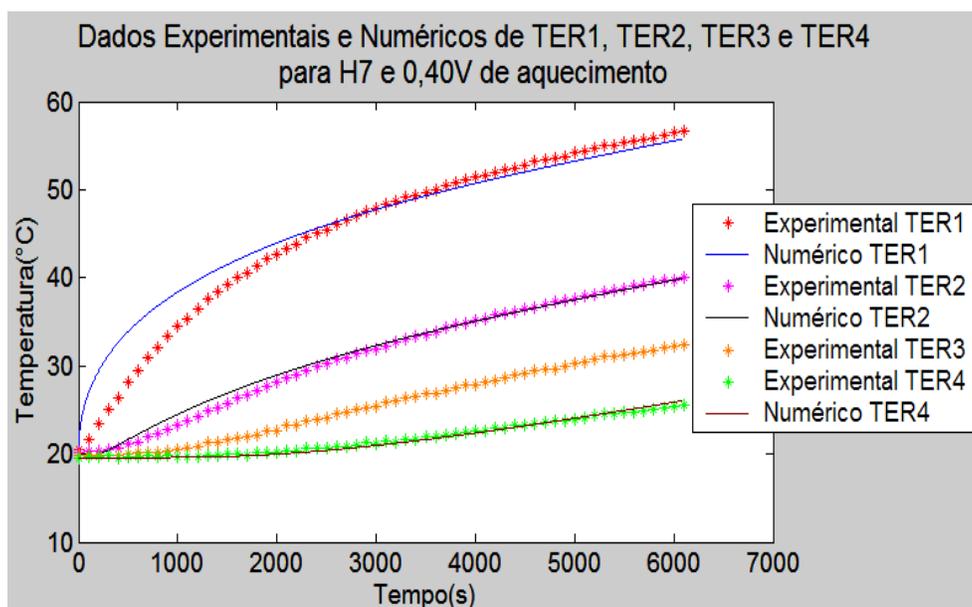


Figura 24: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,40V de aquecimento

A tabela 31 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 31: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,40V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
Ter1	0,160	19,184
Ter2	0,154	4,618
Ter4	0,153	1,766

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica numericamente.

Visualmente, observa-se na figura 24, que para os dados de TER2 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1.

Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

Observa-se que os valores obtidos de condutividade térmica tendem a diminuir à medida que o termopar de referência se afasta do aquecimento central.

5.3.2.13 Conjunto de dados: aquecimento= 0,70V; altura= H5

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,70V e a altura é H5, a temperatura inicial era de 19,4°C.

A figura 25 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H5 e 0,70V de aquecimento nas extremidades.

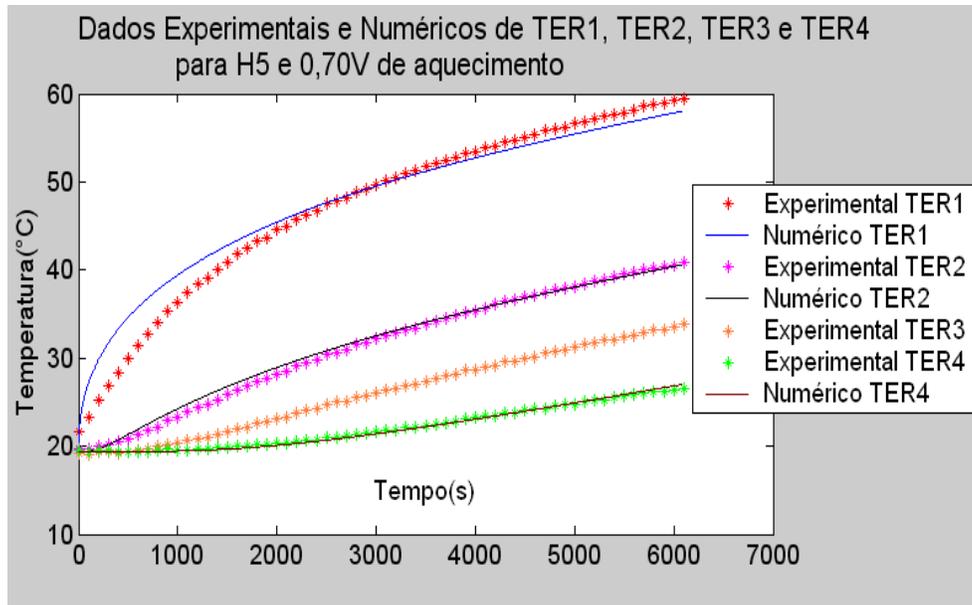


Figura 25: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5, 0,70V de aquecimento

A tabela 32 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 32: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H5 com 0,70V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
TER1	0,144	15,566
TER2	0,137	3,927
TER4	0,197	1,436

Para os dados de TER3 não foi possível determinar a condutividade térmica numericamente.

Visualmente, observa-se na figura 25, que para os dados de TER2 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

5.3.2.14 Conjunto de dados: aquecimento= 0,70V; altura= H6

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,70V e a altura é H6, a temperatura inicial era de 18,3°C.

A figura 26 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H6 e 0,70V de aquecimento nas extremidades.

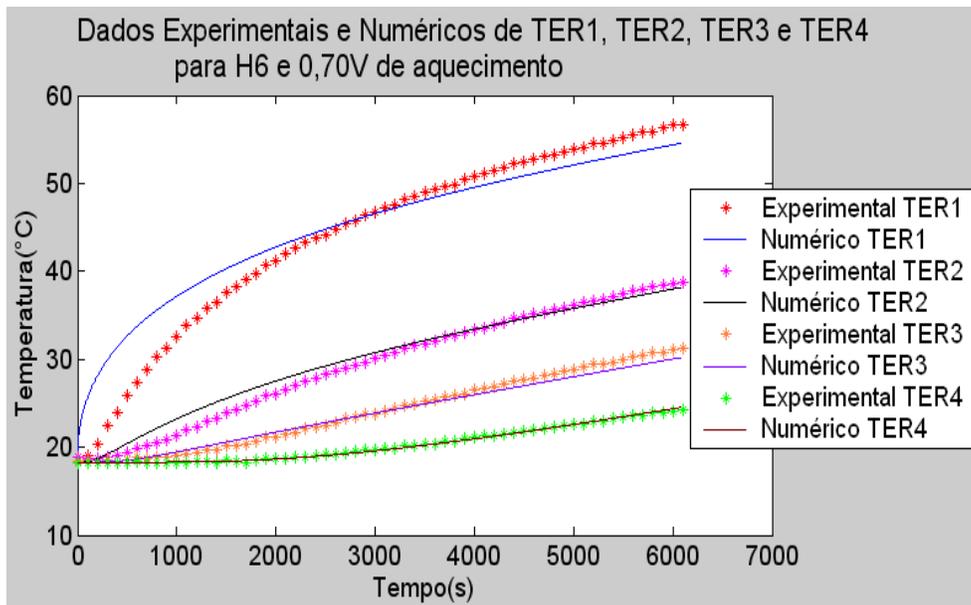


Figura 26: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6, 0,70V de aquecimento

A tabela 33 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 33: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H6 com 0,70V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
Ter1	0,159	24,100
Ter2	0,165	7,471
Ter3	0,201	4,454
Ter4	0,147	0,828

Visualmente, observa-se na figura 26, que para os dados de TER3 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos dados de TER1.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, a curva numérica não está tão próxima aos dados experimentais quanto para TER3 e TER4. Isso é confirmado pelo resíduo mais elevado.

Visualmente, observa-se que para os dados de TER2, a curva numérica não está próxima aos dados experimentais no início do experimento gerando ainda um resíduo mais elevado que para TER3 e TER4. Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

O valor obtido de condutividade térmica para TER3 é mais elevado do que os outros valores obtidos. Este resultado pode ter ocorrido por exemplo, pelo desvio da posição de TER3.

5.3.2.15 *Conjunto de dados: aquecimento= 0,70V; altura= H7*

Para o conjunto de dados onde o aquecimento nas extremidades é de 0,70V e a altura é H7, a temperatura inicial era de 18,4°C.

A figura 27 mostra todas as curvas com dados experimentais e calculados correspondentes aos termopares TER1, TER2, TER3 e TER4 para altura H7 e 0,70V de aquecimento nas extremidades.

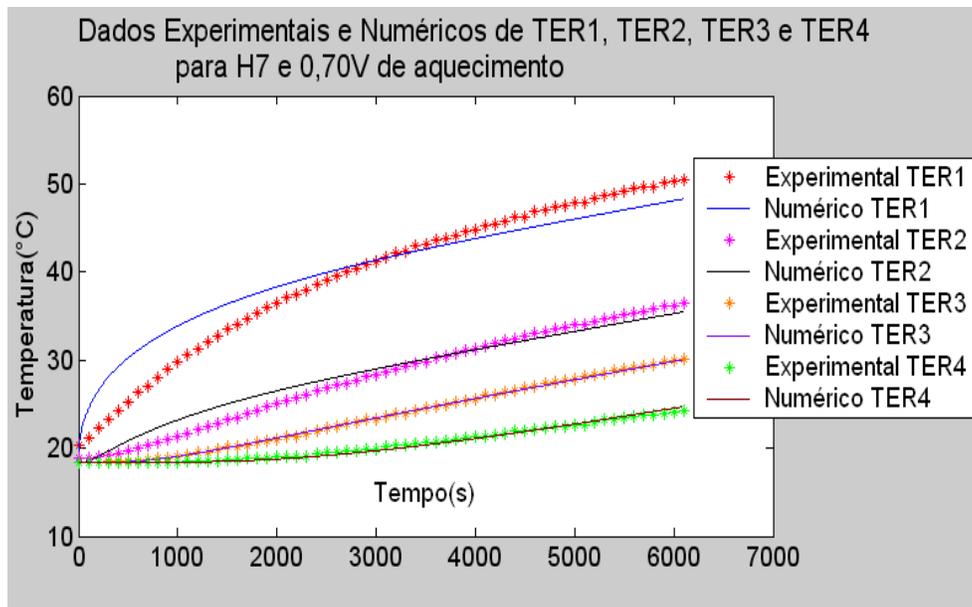


Figura 27: Curvas experimentais e numéricas de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7, 0,70V de aquecimento

A tabela 34 mostra os resíduos gerados pelas curvas numéricas em relação aos dados experimentais:

Tabela 34: Condutividade térmica e resíduo gerado de TER1, TER2, TER3 e TER4 em H7 com 0,70V de aquecimento

Posição da determinação	Condutividade Térmica(W/m°C)	Resíduo(°C)
Ter1	0,219	19,201
Ter2	0,267	8,299
Ter3	0,128	0,633
Ter4	0,149	1,546

Visualmente, observa-se na figura 27, que para os dados de TER3 e TER4 as curvas numéricas e experimentais estão próximas e o resíduo é baixo em relação aos outros dados (TER1 e TER2). Observa-se que para os dados de TER1, a curva numérica cruza os dados experimentais em cerca de 3000s.

Observa-se que para os dados de TER2, o resíduo é mais elevado que para TER3 e TER4. O valor obtido de condutividade térmica para TER2 é mais alto do que os outros valores obtidos. Este resultado pode ter ocorrido, por exemplo, pelo desvio da posição de TER2.

5.3.2.16 Condutividade térmica média

Para que seja possível visualizar a variação axial e quantificar a variação radial da condutividade térmica, construiu-se a tabela 35, com os valores de condutividade térmica média e desvio padrão correspondente, utilizando os dados numéricos obtidos das tabelas 20 a 34.

A condutividade térmica média e o desvio padrão foram determinados entre TER1 e TER4 para cada conjunto de dados (combinação entre as alturas H5, H6 e H7 e os aquecimentos de 0,0V, 0,25V, 0,3V, 0,4V e 0,7V). Os dados obtidos em TER2 e TER3 não foram utilizados já que nestes pontos de determinação existiu a dificuldade em fixar os termopares.

Tabela 35: Condutividade térmica média (entre TER1 e TER4) e desvio padrão para os diferentes aquecimentos e alturas dos termopares

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	Condutividade térmica Média(W/m°C)	Desvio Padrão
0,00	H5	0,174	0,054
0,00	H6	0,163	0,064
0,00	H7	0,171	0,061
0,25	H5	0,180	0,026
0,25	H6	0,179	0,021
0,25	H7	0,170	0,025
0,30	H5	0,167	0,016
0,30	H6	0,191	0,061
0,30	H7	0,163	0,011
0,40	H5	0,176	0,034
0,40	H6	0,173	0,034
0,40	H7	0,157	0,005
0,70	H5	0,171	0,038
0,70	H6	0,153	0,009
0,70	H7	0,184	0,049

Verifica-se pela tabela 35 que há uma variação axial da condutividade térmica.

Os valores de condutividade térmica obtidos pelo método numérico variaram de 0,153 a 0,184 W/m°C. Em regime permanente, os valores obtidos anteriormente variaram de 0,189 a 0,236 W/m°C. DESHPANDE, BAL e OJHA (1996) encontraram para a soja, valores de condutividade entre 0,1157 e 0,1756 W/m°C. NUNES (2000) encontrou valores entre 0,07 e 0,13 W/m°C.

A diferença entre estes valores é explicada pela variação na porosidade da amostra utilizada na determinação da condutividade, além das diferentes metodologias de determinação utilizadas.

A tabela 36 mostra os erros relativos entre a condutividade térmica obtida em regime permanente (tabela 10) e em regime transiente (tabela 35) para cada conjunto de dados (combinação entre as alturas H5, H6 e H7 e os aquecimentos de 0,0V, 0,25V, 0,3V, 0,4V e 0,7V). O erro relativo foi determinado fazendo $E_r = ((k_{\text{permanente}} - k_{\text{transiente}}) / k_{\text{permanente}}) \times 100$.

Tabela 36: Erro relativo dos valores obtidos de k entre regime permanente e regime transiente

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	Er
0,00	H5	25,96
0,00	H6	27,88
0,00	H7	25,33
0,25	H5	23,29
0,25	H6	21,83
0,25	H7	18,12
0,30	H5	11,90
0,30	H6	04,02
0,30	H7	14,02
0,40	H5	24,79
0,40	H6	25,43
0,40	H7	24,76
0,70	H5	16,83
0,70	H6	22,73
0,70	H7	22,03

O erro relativo variou de 4,02% até 27,88% sendo que a maioria dos valores obtidos se encontram na faixa de 20% a 26%.

Simplificações adotadas para o estabelecimento do modelo matemático assim como a determinação da transferência de calor desconsiderando perdas para o regime permanente, podem ter influenciado na diferença encontrada entre os valores de $k_{\text{numérico}}$ e $k_{\text{permanente}}$.

5.3.2.17 Difusividade térmica média

A difusividade térmica média foi calculada utilizando a equação 2 e os dados de condutividade térmica média da tabela 35.

A tabela 37 mostra os valores de condutividade térmica média e o desvio padrão determinados de TER1 e TER4 para cada conjunto de dados (combinação entre as alturas H5, H6 e H7 e os aquecimentos de 0,0V, 0,25V, 0,3V, 0,4V e 0,7V). Os dados obtidos em TER2 e TER3 não foram utilizados já que nestes pontos de determinação existiu a dificuldade em fixar os termopares.

Tabela 37: Difusividade térmica média (entre TER1 e TER4) e desvio padrão para os diferentes aquecimentos e alturas dos termopares

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	Difusividade térmica Média(W/m°C)	Desvio padrão
0,00	H5	7,49E-08	2,31E-08
0,00	H6	7,01E-08	2,74E-08
0,00	H7	7,36E-08	2,62E-08
0,25	H5	7,72E-08	1,13E-08
0,25	H6	7,70E-08	0,91E-08
0,25	H7	7,29E-08	1,06E-08
0,30	H5	7,16E-08	0,70E-08
0,30	H6	8,22E-08	2,62E-08
0,30	H7	6,99E-08	0,45E-08
0,40	H5	7,57E-08	1,46E-08
0,40	H6	7,44E-08	1,46E-08
0,40	H7	6,73E-08	0,21E-08
0,70	H5	4,89E-08	1,61E-08
0,70	H6	6,58E-08	0,37E-08
0,70	H7	7,92E-08	2,13E-08

Verifica-se pela tabela 37 que há uma variação axial da difusividade térmica.

Os valores de difusividade térmica obtidos pelo método numérico variaram de $4,89 \times 10^{-8}$ a $8,22 \times 10^{-8}$ m²/s. Em regime permanente, os valores obtidos

anteriormente variaram de $8,13 \times 10^{-8}$ a $10,20 \times 10^{-8}$ m^2/s . DESHPANDE, BAL e OJHA (1996) encontraram para a soja, valores de difusividade entre $8,17 \times 10^{-8} m^2/s$ a $8,53 \times 10^{-8} m^2/s$. NUNES (2000) encontrou valores entre $2,90 \times 10^{-8} m^2/s$ a $4,46 \times 10^{-8} m^2/s$. A diferença entre estes valores é explicada pela variação na porosidade da amostra utilizada na determinação da condutividade, além das diferentes metodologias de determinação utilizadas.

A tabela 38 mostra os erros relativos obtidos entre a difusividade térmica obtida em regime permanente (tabela 11) e em regime transiente (tabela 38 e 39) para cada conjunto de dados (combinação entre as alturas H5, H6 e H7 e os aquecimentos de 0,0V, 0,25V, 0,3V, 0,4V e 0,7V). O erro relativo foi determinado fazendo $Er = ((\alpha_{permanente} - \alpha_{transiente}) / \alpha_{permanente}) \times 100$.

Tabela 38: Erro relativo dos valores obtidos de difusividade térmica

Voltagem de aquecimento(V)	Altura dos termopares	Er de α (tabela 11 e tabela 38)	Er
0,00	H5	25,84	25,84
0,00	H6	18,31	27,88
0,00	H7	25,79	25,28
<hr/>			
0,25	H5	24,23	23,64
0,25	H6	31,27	21,83
0,25	H7	23,26	18,09
<hr/>			
0,30	H5	27,31	11,93
0,30	H6	1,99	3,97
0,30	H7	25,71	14,02
<hr/>			
0,40	H5	24,08	24,98
0,40	H6	12,63	25,45
0,40	H7	25,14	24,80
<hr/>			
0,70	H5	22,34	44,56
0,70	H6	20,77	22,77
0,70	H7	10,69	22,35

O erro relativo variou de 1,99% até 31,27% sendo que a maioria dos valores obtidos se encontram na faixa de 20% a 26%.

Simplificações adotadas para o estabelecimento do modelo matemático assim como a determinação da transferência de calor desconsiderando perdas para o regime permanente, podem ter influenciado na diferença encontrada entre os valores de $k_{\text{numérico}}$ e $k_{\text{permanente}}$.

VI CONCLUSÕES

O sistema proposto - que permite o acompanhamento e visualização do processo – mostrou a sua utilidade didática, bem como o potencial da modelagem matemática e simulação numérica de processos como uma ferramenta capaz de auxiliar nos processos referentes ao conhecimento e/ou determinação de propriedades físicas de materiais biológicos de importância para a engenharia agrícola.

O método numérico das diferenças finitas explícito se mostrou eficiente para a resolução da equação expressa no modelo matemático, uma vez garantida a condição de estabilidade.

Comparando os valores médios encontrados, ao longo do raio para cada altura, para a condutividade e a difusividade térmica em regime permanente e em regime transiente, nota-se um erro relativo em torno de 23%, os quais são admissíveis se comparados com valores difundidos na literatura.

Não foi possível verificar a influência do aquecimento nas faces laterais para minimizar possíveis transferências de calor na direção axial.

A maior fonte de erro neste tipo de determinação pode ser proveniente da posição incorreta do termopar.

VII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, A.; SHOVE, G. C. Simulation of soybean drying. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 16 n. 1, p. 134-136, 1973a.

ALAM, A.; SHOVE, G. C. Hygroscopicity and thermal properties of soybeans. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 16 n. 4, p. 707-709, 1973b.

AMENDOLA, M. **Resolução numérica de um problema de fronteira livre: cavitação na lubrificação hidrodinâmica de mancais**. 1996. 170 f. Dissertação (Doutorado em Matemática Aplicada e Computação Científica) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Moisture measurement-unground grains and seeds**, 1991, p. 399. (ASAE Data, S352.2)

ARPACI, V. S. **Conduction heat transfer**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1966. 550 p.

BENEDETTI, B. C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**, 1987. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1960. 780 p.

BOLDRINI, J. L. **Álgebra linear**. 3.ed. São Paulo: HARBRA, 1984. 411p.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D.; REYNOLDS, A. C. **Numerical analysis**. 2.ed. Boston: Prindle, Weber & Schimidt, 1981. 597p.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. 2.ed. Oxford: Oxford University Press, 1959. 509 p.

CHANDRA, S.; MUIR, W. E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 14, n. 4, p. 644-646, 1971.

CHANG, C. S. Thermal conductivity of wheat, corn and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 29, n. 5, p. 1447-1450, 1986.

CHAPMAN, A. J. **Heat transfer**. 2. ed. New York: MacMillan, 1967. 617 p.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LEMAUGUER, M.; JELEN, M. **Food engineering and process applications**. London, New York: Elsevier, 1986. p. 93-101.

CONVERSE H. H.; GRAVES A. H.; CHUNG D. S. Transient heat-transfer within wheat stored in a cylindrical bin. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.16, n. 1, p. 129-133, 1973.

DAL FABBRO, I. M.; NUNES, A. S. Thermal behavior of moist soil. **EurAgEng, 2000**: Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering. Warwick: EurAgEng, 2000. Paper Number:00 – SW – 031. CD-ROM.

DESHPANDE, S. D.; BAL, S. Specific heat of soybean. **Journal of food process engineering**, Trumbull, vol. 22, n. 6, p 469-477, 1999.

DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Physical properties of soybean. **Journal of agricultural engineering research**, London, vol. 56, n. 2, p 89-98, 1993.

DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Bulk thermal conductivity and diffusivity of soybean. **Journal of food process and preservation**, Trumbull, vol. 20, n. 3, p 177-189, 1996.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. 422p.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. 1981. 122 f. M. Sc. Thesis - Cranfield Institute of Technology, National College of Agricultural Engineering.

GUBULIN, J. C.; FREIRE, J. T. **Laboratório didático: tópicos especiais em fenômenos de transporte**. UFSCar: São Carlos, 1990. 165p.

GUO, C.; MALKIN, S. Analysis of transient temperatures in grinding. **Journal of Engineering for Industry**, New York, v. 117, n. 4, p. 571-577, 1995.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 1992. 455p.

JASANSKY, A.; BILANSKI, W. K. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 16, n. 1, p. 100-103, 1973.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grain. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 8, n. 1, p. 33-37, 1965.

KUSTERMANN, M.; SCHERER, R.; KUTZBACH, H. Thermal conductivity and diffusivity of shelled corn and grain. **Journal of food process engineering**, vol. 4, p 137-153, Food and Nutrition Press, 1981.

MAGEE, T. R. A.; BRANSBURG, T. Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 25, n. 2, p. 223-232, 1995.

MANDHYAN, B. L.; PRASAD, S. Effect of particle-size, moisture-content, pressure and temperature on the physical and thermal-properties of soybean. **Journal of food science and technology-Mysore**, Mysore, v. 31 n. 5, p. 395-399, 1994.

MISRA, R. N.; YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybeans drying. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 23, n. 5, p. 1277-1282, 1980.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon and Breach science Publishers, 1980. 407 p.

MUIR, W. E.; VIRAVANICHAL, S. Specific heat of wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 17, p. 338-342, 1972.

NASTAC, L. On the validity of the quasy-steady state equation for heat or mass transfer problems with axially moving boundary. **International communications in heat and mass transfer**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 407-416, 1998.

NUNES, A. S. **Determinação das propriedades térmicas de grãos de soja**. 2000. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

OXLEY, T. A. The properties of grain in bulk. II. The thermal conductivity of wheat, maize and oats. **Transactions society of chemical industries**, v. 63, p. 53-55, 1944.

ÖZISIK, M. N. **Boundary value problems of heat conduction**. USA: International Textbook Company, 1968. 505 p.

ÖZISIK, M. N. **Heat conduction**. New York : J. Wiley, 1980. 687 p.

PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; NUNES, A. S. Determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de grãos em regime permanente. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 264-269, 1999.

PARK, K. J.; ITO, A. P.; LEITE, J. T. C. Influência da granulometria, do diâmetro e do comprimento de amostras de grãos triturados de soja na determinação de coeficientes simultâneos de transferência. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 136-142, 2002.

SCHNEIDER, P. J. **Conduction heat transfer**. Reading : Addison-Wesley, 1955. 395 p.

SHARMA D. K.; THOMPSON T. L. Specific-heat and thermal-conductivity of Sorghum. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v. 16, n. 1, p. 114-117, 1973

SHIKI, M. P.; PARK, K. J. Determination of simultaneous heat and mass transfer coefficients for food products. **Drying 98**: Proceedings of the 11th International drying symposium. Thessaloniki-Greece: Ziti Editions, v. B, p.1288-1294, 1998.

SHYAMAL, D. K.; CHAKRAVERTY, A.; BANERJEE, H. D. Thermal properties of raw, parboiled and debranned parboiled wheat and wheat bulgur. **Energy conversion and management**, Oxford, v. 35, n. 9, p. 801-804, 1994.

SREENARAYANAN, V. V.; CHATTOPADHYAY, P. K. Thermal conductivity and diffusivity of rice bran. **Journal of agricultural engineering research**, London, v. 34, p. 115-121, 1986.

SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivity probe for small food samples. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v. 17, p. 56-58, 1974.

TERESO, M. J. A. **Modelo de elementos finitos para simulação matemática do perfil térmico de solos agrícolas**. 1984. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

TERESO, M. J. A.; DAL FABBRO, I. M.; ABRAHÃO, R. F. A finite element formulation for thermal behaviour of agricultural soils. **EurAgEng, 2000**: Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering. Warwick: EurAgEng, 2000. Paper Number:00 – SW – 002. CD-ROM.

WATTS, K. C., BILANSKI, W. K. Method for estimating the thermal diffusivity of whole soybeans. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v. 16, n. 6, p. 1143-1145, 1973.

APÊNDICES

Apêndice 1: Esquema do equipamento construído:

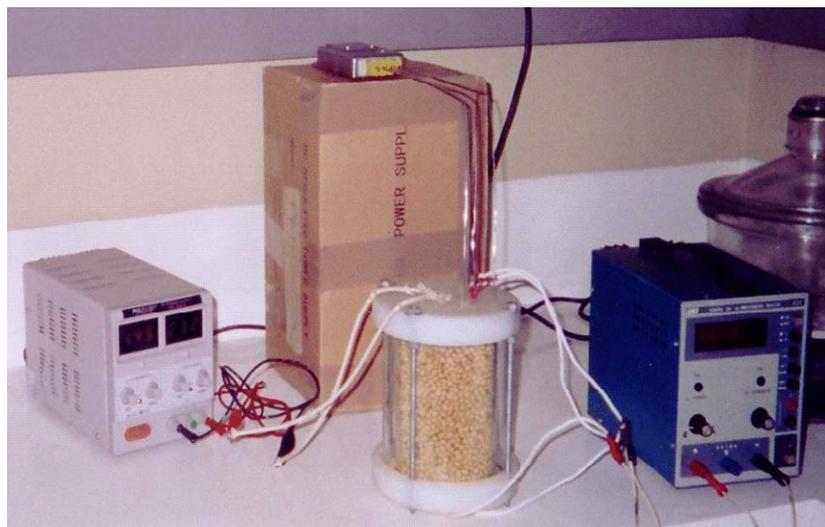
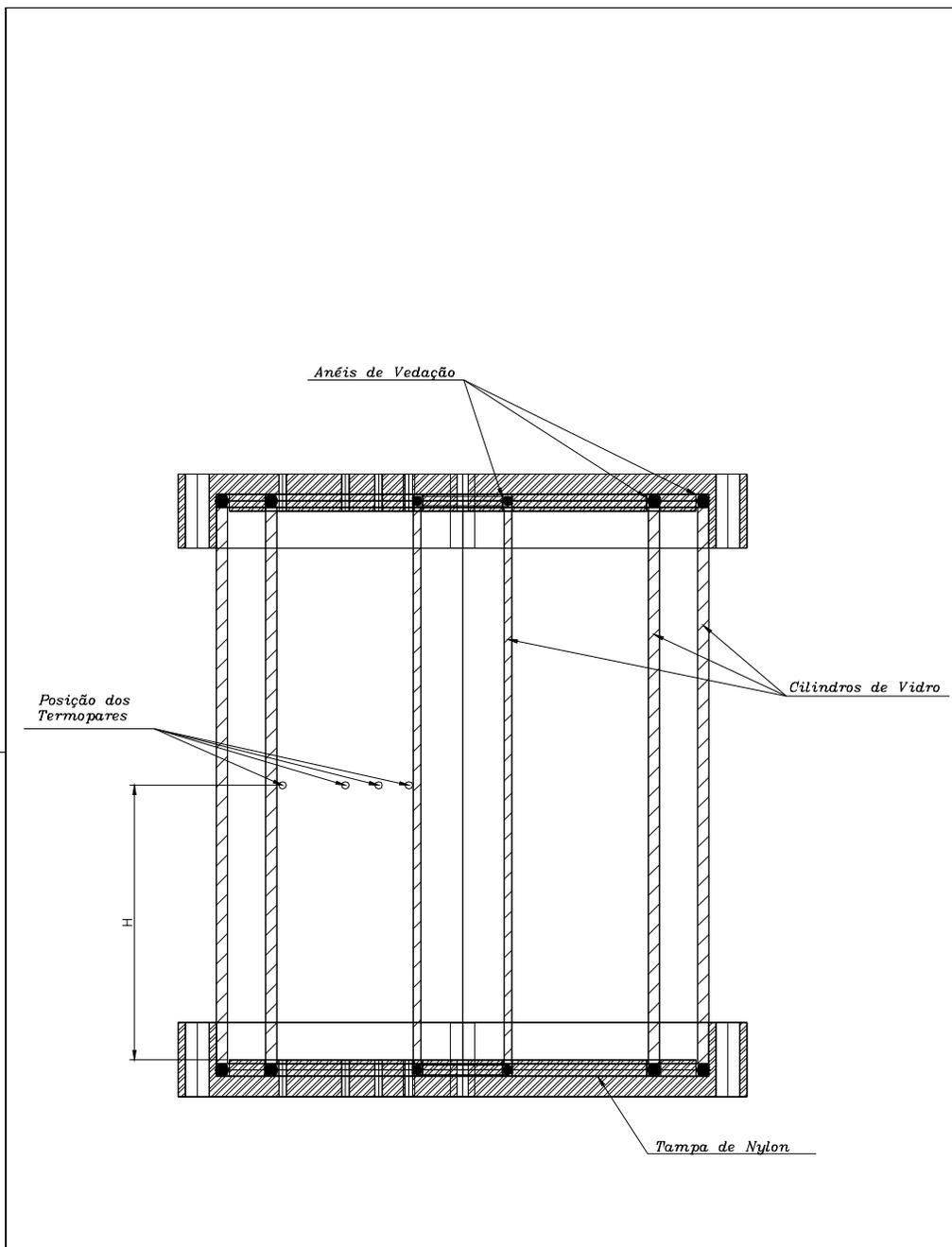


Figura 28: Esquema de montagem do equipamento

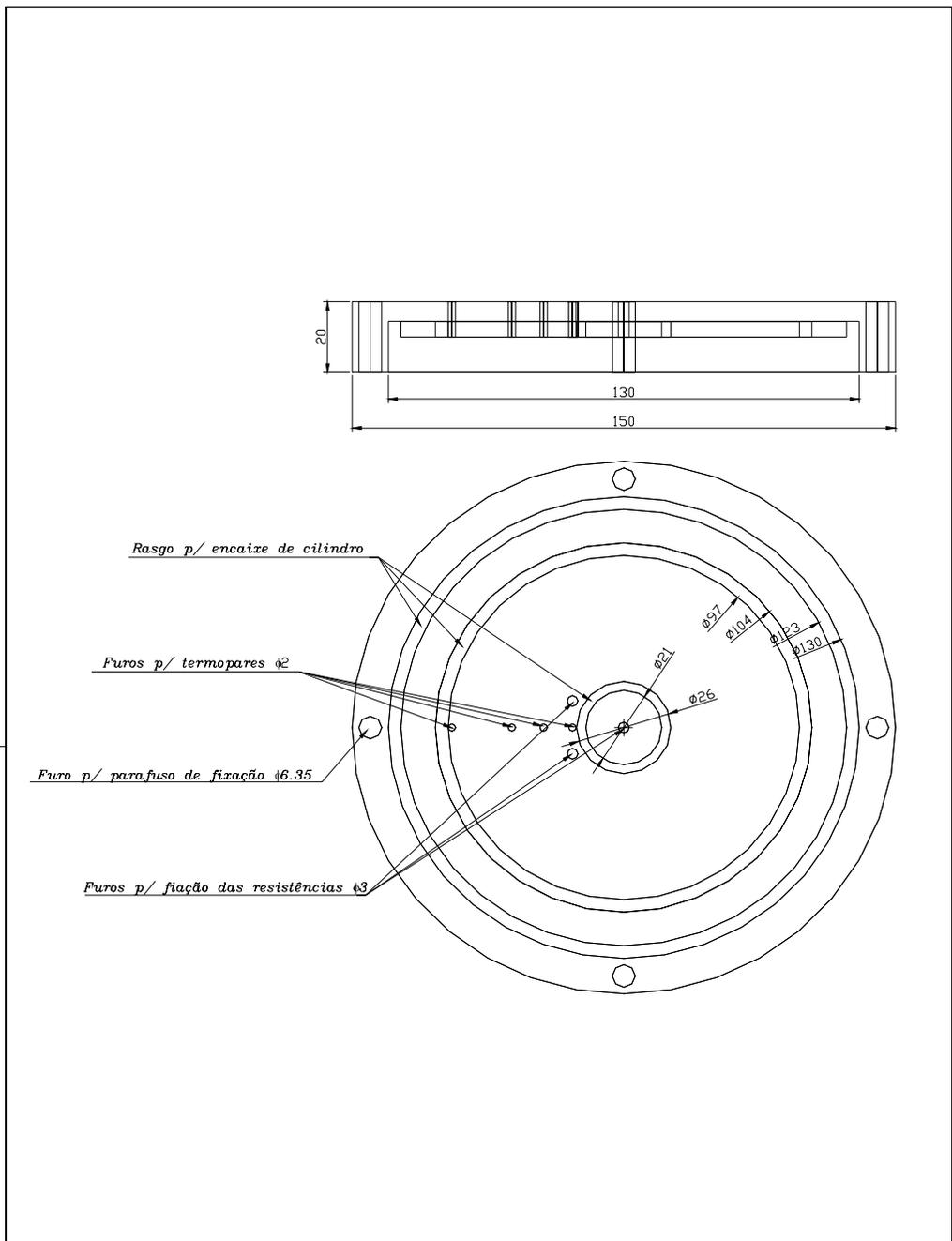


Figura 29: Detalhe da montagem do equipamento



Material: Nylon, vidro e borracha		
Denominação: Cilindro Completo	Conjunto: Cilindro Completo	Peça:
Desenho No.: 1/1	Desenhista: ENG. RAFAEL OLIVEIRA	Data: 14/11/02
Projeto: Determinação de Condutividade Térmica		UNICAMP
Escala: S/E	Arquivo: Cilindro.dwg	

Figura 30: Cilindro completo



Material: Nylon			
Denominação: Tampa	Conjunto: Cilindro Completo	Peça:	
Desenho No.: 1/2	Desenhista: ENG. RAFAEL OLIVEIRA	Data: 14/11/02	
Projeto: Determinação de Condutividade Térmica		UNICAMP	
Escala: S/E	Arquivo: Tampa.dwg		

Figura 31: Dimensões da tampa

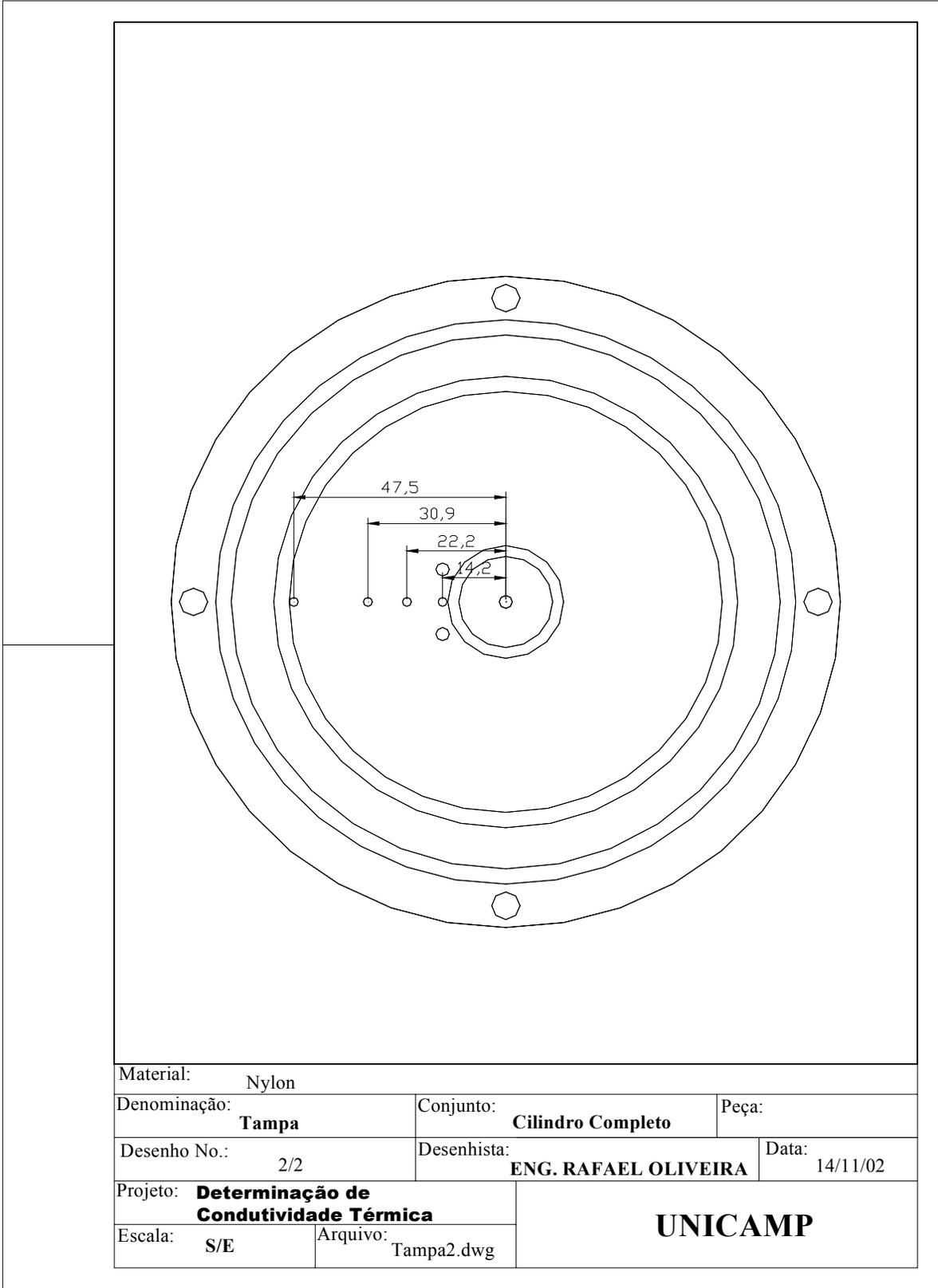
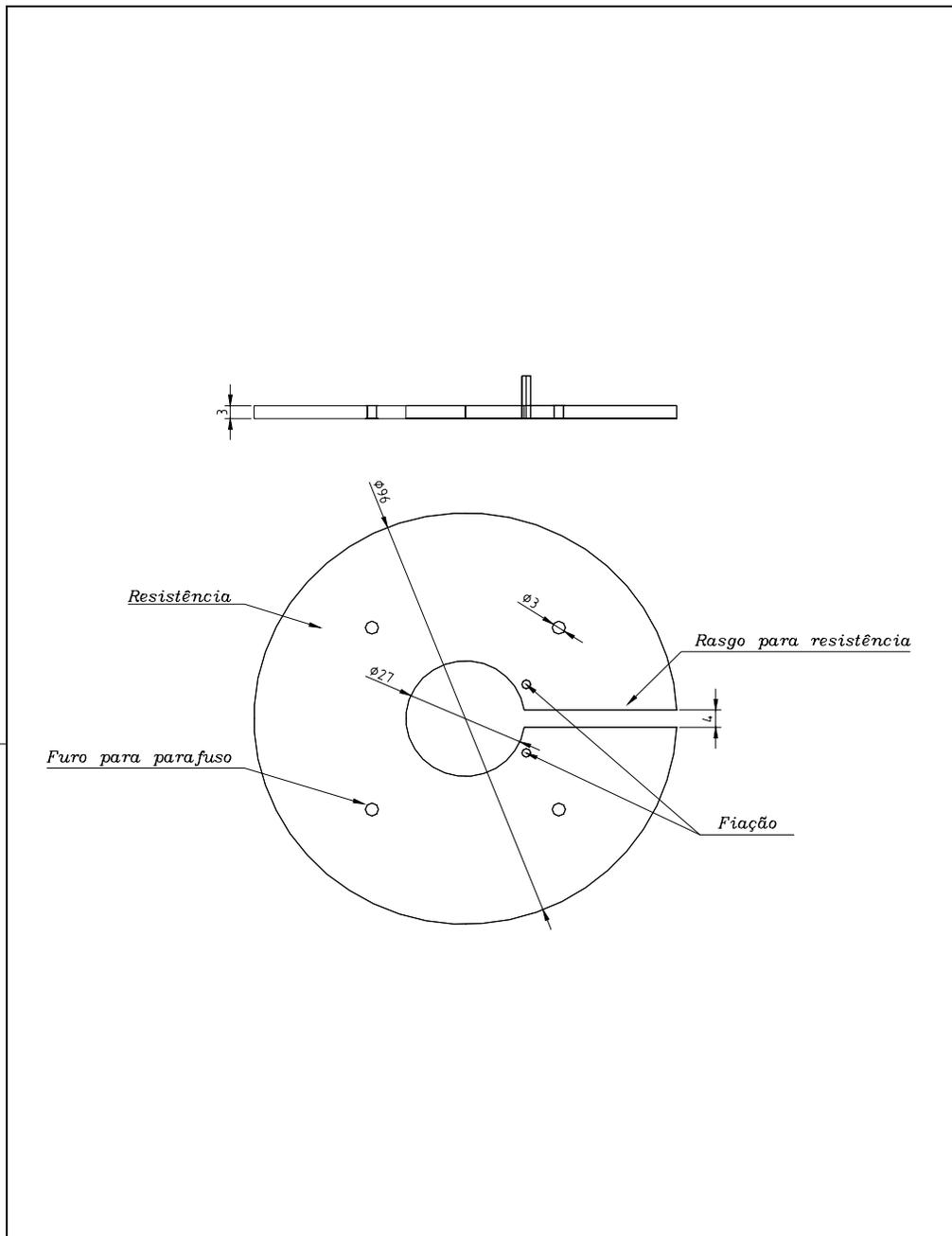


Figura 32: Posições dos termopares na tampa



Material:		
Denominação: Resistência circular	Conjunto:	Peça:
Desenho No.: 1/1	Desenhista: ENG. RAFAEL OLIVEIRA	Data: 14/11/02
Projeto: Determinação de Condutividade Térmica		UNICAMP
Escala: S/E	Arquivo: Resist.dwg	

Figura 33: Resistência circular

Apêndice 2: Dados experimentais de temperatura

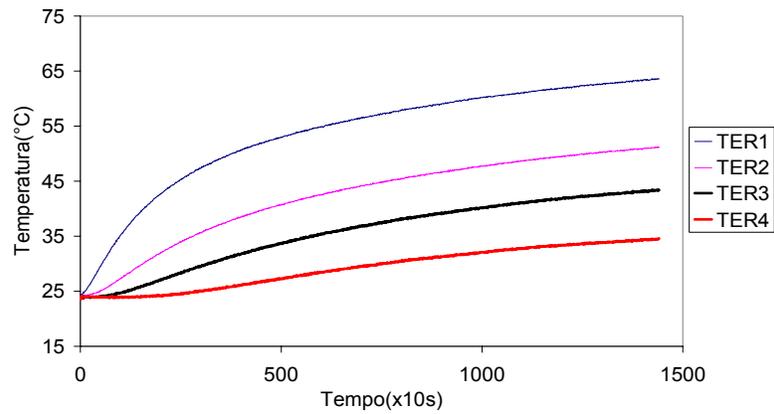


Figura 34: Dados de temperatura em função do tempo em H5 sem aquecimento nas extremidades

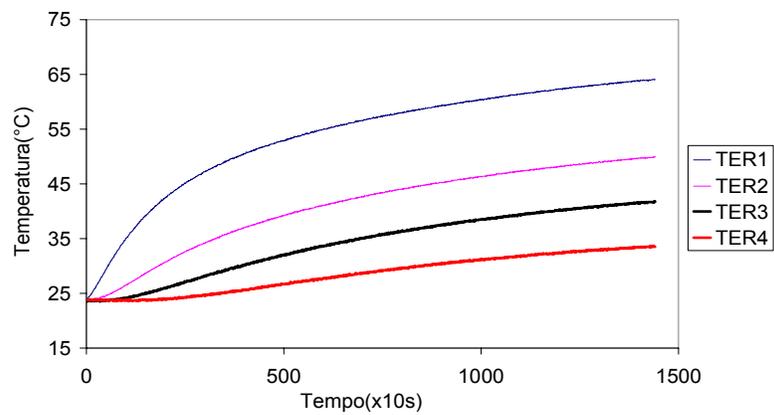


Figura 35: Dados de temperatura em função do tempo em H6 sem aquecimento nas extremidades

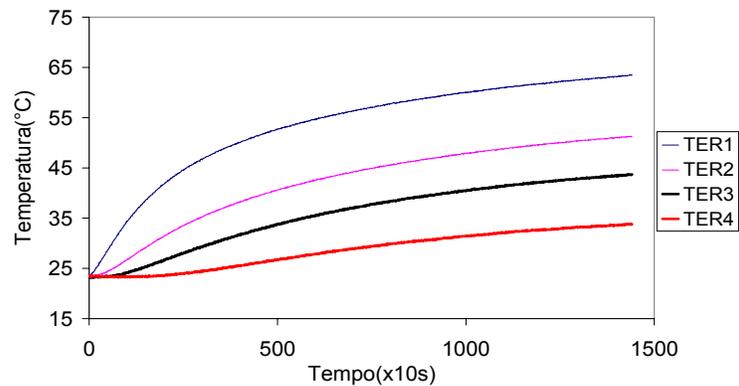


Figura 36: Dados de temperatura em função do tempo em H7 sem aquecimento nas extremidades

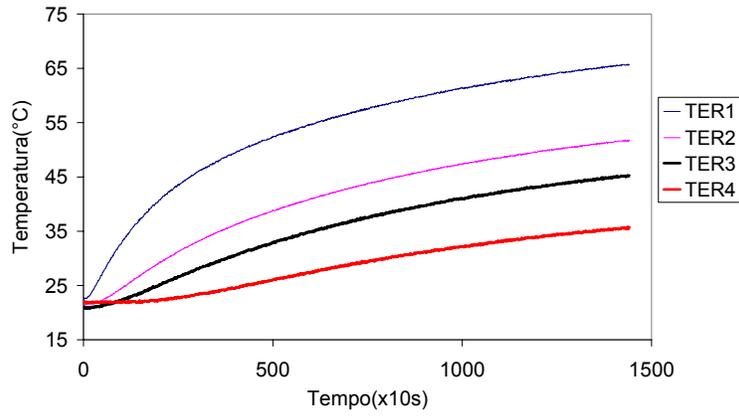


Figura 37: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,25V de aquecimento nas extremidades

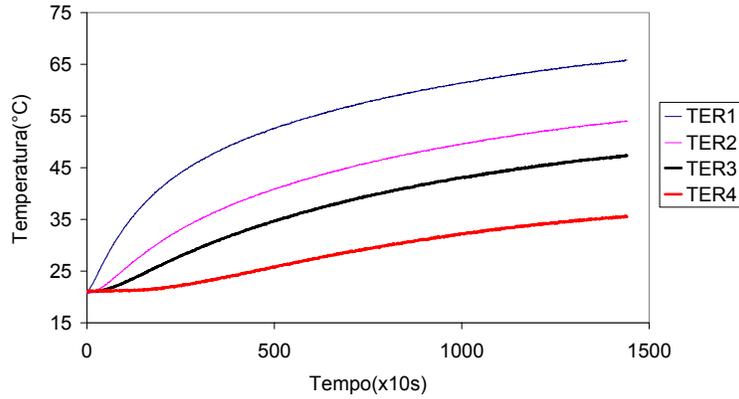


Figura 38: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,25V de aquecimento nas extremidades

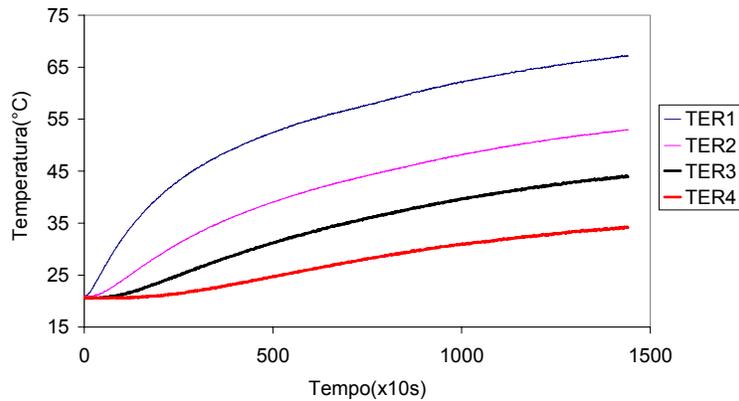


Figura 39: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,25V de aquecimento nas extremidades

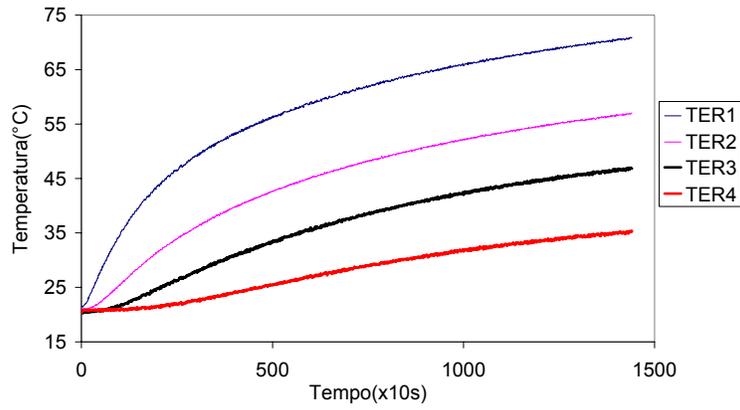


Figura 40: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,30V de aquecimento nas extremidades

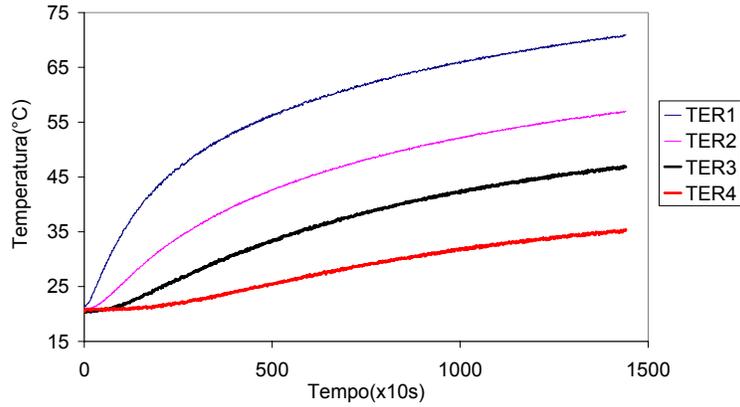


Figura 41: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,30V de aquecimento nas extremidades

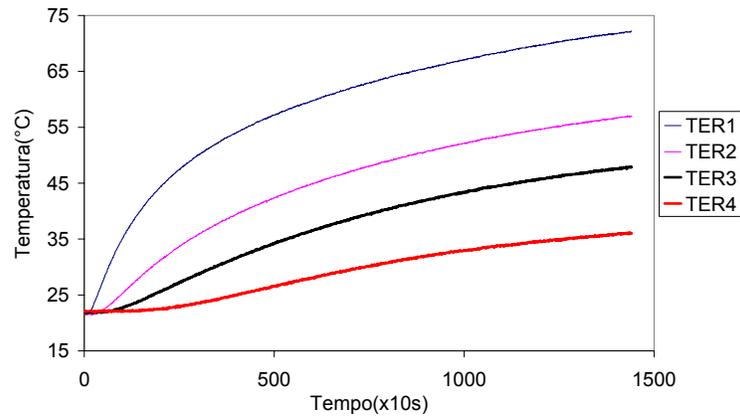


Figura 42: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,30V de aquecimento nas extremidades

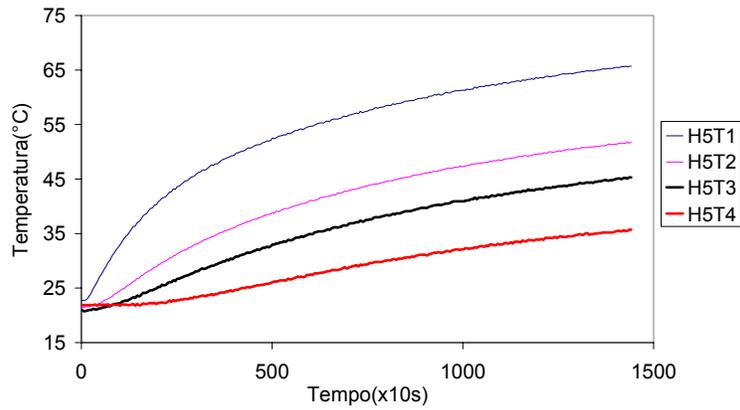


Figura 43: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,40V de aquecimento nas extremidades

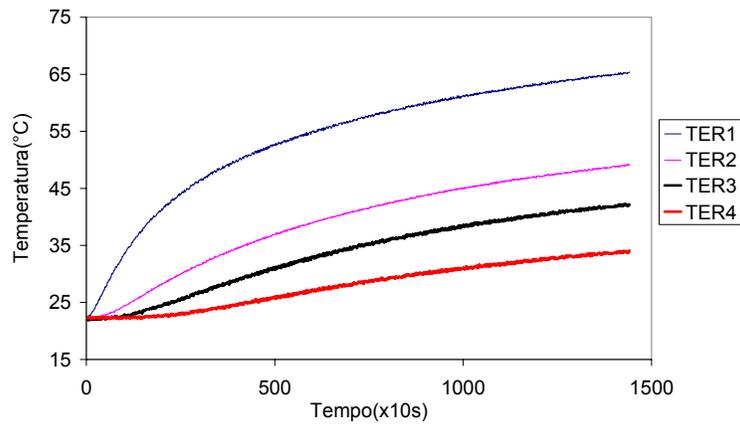


Figura 44: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,40V de aquecimento nas extremidades

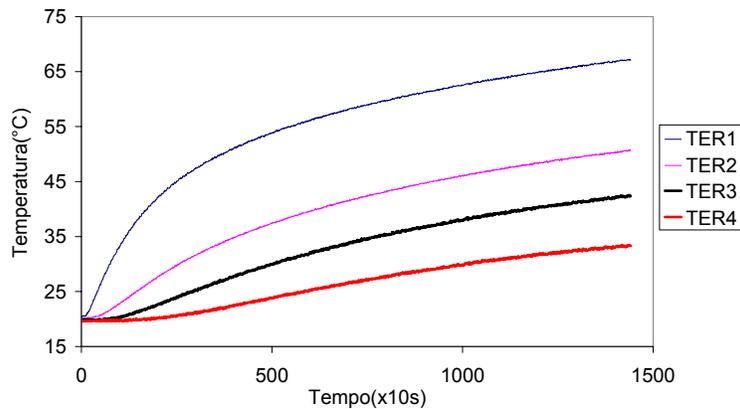


Figura 45: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,40V de aquecimento nas extremidades

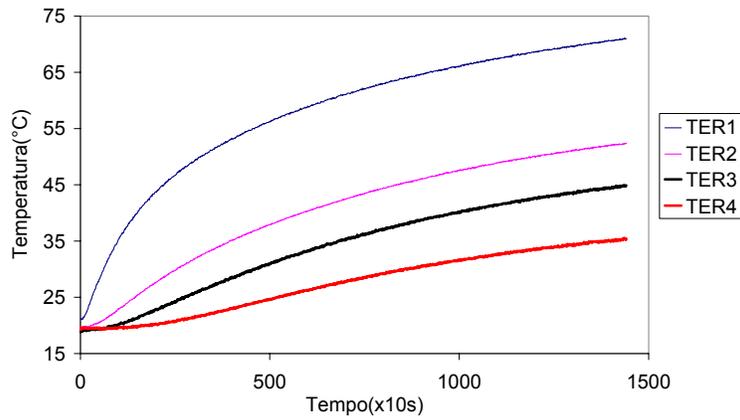


Figura 46: Dados de temperatura em função do tempo em H5 com 0,70V de aquecimento nas extremidades

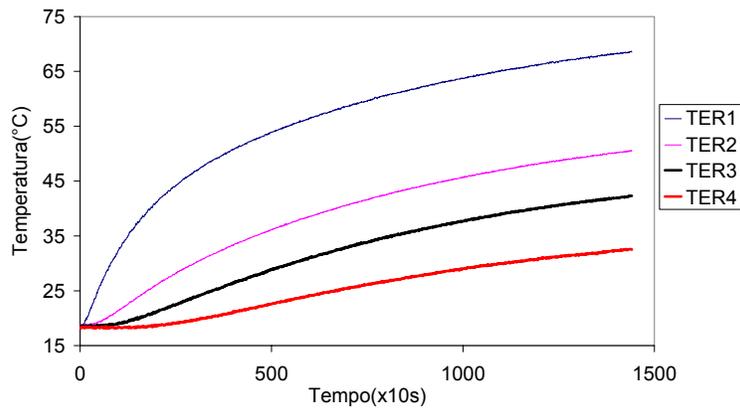


Figura 47: Dados de temperatura em função do tempo em H6 com 0,70V de aquecimento nas extremidades

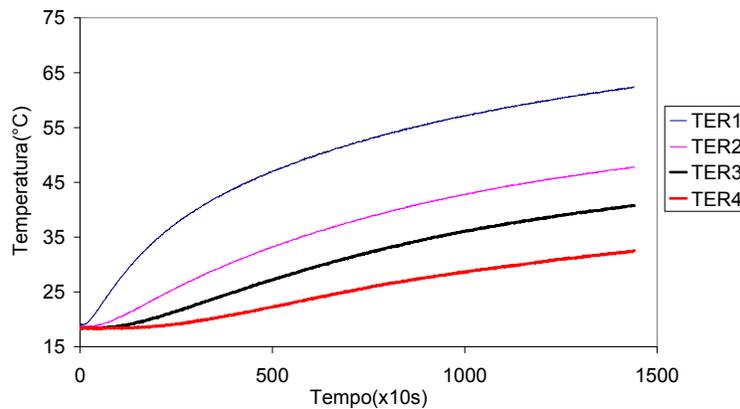


Figura 48: Dados de temperatura em função do tempo em H7 com 0,70V de aquecimento nas extremidades