

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola



UNICAMP

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE GRÃOS DE SOJA

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Alexandre Sznelwar Nunes e aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de fevereiro de 2000. Campinas, 21 de junho de 2000.

ALEXANDRE SZNELWAR NUNES

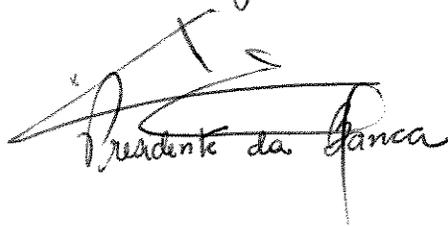
Engenheiro Agrônomo

Prof. Dr. KIL JIN PARK

Orientador

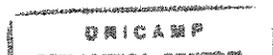
Prof. Dr. INÁCIO MARIA DAL FABBRO

Co-orientador


Presidente da Banca

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Campinas, fevereiro de 2000



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola**



UNICAMP

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE GRÃOS DE SOJA

ALEXANDRE SZNELWAR NUNES

Engenheiro Agrônomo

Prof. Dr. KIL JIN PARK

Orientador

Prof. Dr. INÁCIO MARIA DAL FABBRO

Co-orientador

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Campinas, fevereiro de 2000

2000.02.03.02

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola**



UNICAMP

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE GRÃOS DE SOJA

ALEXANDRE SZNELWAR NUNES

Engenheiro Agrônomo

Prof. Dr. KIL JIN PARK

Orientador

Prof. Dr. INÁCIO MARIA DAL FABBRO

Co-orientador

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 2000

LIBRARY
I.ª CHAMADA:
T/UNICAMP
N922d
Ex
PREÇO DC/ 41822
VENC. 278 700
C D
RECIBO RB.11.00
DATA 05-03-00
I.ª CPD

CM-00142773-1

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

Nunes, Alexandre Szelwar

N922d Determinação das propriedades térmicas de grãos de soja
/ Alexandre Szelwar Nunes.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientadores: Kil Jin Park, Inácio Maria Dal Fabbro.

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

1. Difusividade térmica. 2. Grãos - Secagem. 3. Soja -
Propriedades térmicas. I. Park, Kil Jin. II. Dal Fabbro,
Inácio Maria. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Ofereço aos meus pais, Eduardo e Selma, ao Fábio, meu irmão, a minha avó Ima e a minha Tia Egle, pela *mishparrá (família)* maravilhosa que vocês são.

Eu amo vocês!!!

Dedico ao meu avô,
Izaak Sznelwar (in memoriam, z'l).

*“É muito melhor arriscar coisas grandiosas,
alcançar triunfos e glória,
mesmo expondo-se a derrota,
do que formar fila com os pobres de espírito
que nem gozam muito, nem sofrem muito,
porque vivem nessa penumbra cinzenta
que não conhece vitória nem derrota.”*

Theodore Roosevelt.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Kil Jin Park e Inácio Maria Dal Fabbro, pela orientação, paciência, entusiasmo, dedicação e acima de tudo por acreditarem em mim e me concederem o privilégio da vossa amizade.

Ao amigo do peito Fernando Pedro Reis Brod, pela sua paciência, apoio e ajuda nas horas difíceis e principalmente pela sua amizade.

A outro grande amigo, Luís Felipe Toro Alonso, pela paciência, companhia, ajuda e amizade.

Ao meu Tio Armando, pelo carinho e pela ajuda na construção do equipamento.

A Karin, pelo apoio, compreensão e carinho.

Ao Laurent, pela ajuda e amizade.

As amigas da pós-graduação, Fabiana, Cibele, Sara, pelos bons momentos vividos durante este período.

Ao Kil Jin Brandini Park pela ajuda no tratamento dos dados experimentais.

Ao Ricardo Gomes Almeida pela ajuda nos desenhos do equipamento.

A Faculdade de Engenharia Agrícola através de seus docentes e funcionários pela oportunidade de realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão de bolsa de mestrado.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização desta pesquisa deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
NOMENCLATURA.....	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. TEORIA BÁSICA.....	5
2.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.2. PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DE FOURIER	5
2.3. EQUAÇÃO GERAL DA DIFUSÃO DE CALOR.....	7
2.4. CONDUÇÃO DE CALOR EM PLACAS HOMOGÊNEAS INFINTAS, EM REGIME PERMANENTE	8
2.5. CONDUÇÃO RADIAL DE CALOR ENTRE DUAS SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS CONCÊNTRICAS, EM REGIME PERMANENTE.....	9
2.6. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA VAPORIZAÇÃO EM REGIME PERMANENTE.	10
2.7. CONDUÇÃO RADIAL DE CALOR EM UM CILINDRO INFINITO EM REGIME TRANSIENTE	10
2.8. TEORIA DA FONTE LINEAR DE CALOR E DA FONTE PONTUAL DE CALOR	11
2.9. CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA DIMENSÃO EM COORDENADAS CARTESIANAS SOB REGIME DE EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	13
2.10. CONDUÇÃO RADIAL DE CALOR ENTRE DUAS SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS CONCÊNTRICAS EM REGIME DE EQUILÍBRIO DINÂMICO	18
III. REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	21
3.2. DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	25
3.3. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES TÉRMICAS - MÉTODOS EM REGIME PERMANENTE	29
3.4. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES TÉRMICAS - MÉTODO DO REGIME TRANSIENTE	31
3.5. MÉTODO DA FONTE LINEAR DE AQUECIMENTO (LINE HEAT SOURCE METHOD)	35
3.6. MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO	43
IV. MATERIAL E MÉTODOS.....	49
4.1. MATERIAL	49
4.1.1. <i>Matéria-prima</i>	49
4.1.1.1. Umidificação	49
4.1.2. <i>Determinação da Densidade real</i>	52
4.1.3. <i>Determinação da Densidade aparente</i>	52
4.1.4. <i>Porosidade</i>	53
4.1.5. <i>Determinação do Diâmetro médio</i>	53
4.1.6. <i>Determinação das Propriedades térmicas</i>	55
4.1.6.1. Método da Sonda.....	55
4.1.6.2. Método do Regime Permanente	58
4.1.6.3. Método do Equilíbrio Dinâmico.....	60
4.1.6.3.1. Equipamento	60
4.1.6.3.2. Funcionamento do Equipamento	65
4.1.6.3.3. Montagem do Sistema Elétrico de Controle	67

4.1.6.3.4. Metodologia de Cálculo	68
V. RESULTADOS	69
5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	69
5.1.1. <i>Densidade real</i>	69
5.1.2. <i>Densidade Aparente</i>	70
5.1.3. <i>Diâmetro médio da partícula</i>	71
5.1.4. <i>Porosidade</i>	72
5.1.5. <i>Teor de Umidade</i>	73
5.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	75
5.2.1. <i>Método da Sonda (Regime Transiente)</i>	75
5.2.2. <i>Método do Regime Estacionário</i>	87
5.2.3. <i>Método do Equilíbrio Dinâmico</i>	97
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS	110
5.4. RESULTADOS FINAIS.....	113
VI. CONCLUSÕES.....	116
VII. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	118
APÊNDICES.....	1
APÊNDICE 1: DADOS E RESULTADOS OBTIDOS EM DISQUETE.....	1
APÊNDICE 2: DESENHOS ESQUEMÁTICOS DO EQUIPAMENTO PARA O MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO	2

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: VALORES DOS ERROS CALCULADOS EM FUNÇÃO DOS VALORES DE β	13
QUADRO 2: PROPRIEDADES TÉRMICAS DO FEIJÃO EM VÁRIOS NÍVEIS DE UMIDADE E TEMPERATURA.....	34
QUADRO 3: COMPARAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO MILHO PARA DIFERENTES MÉTODOS.....	48
QUADRO 4: DISTRIBUIÇÃO OS MATERIAIS DE ACORDO COM O TEOR DE UMIDADE E GRANULOMETRIA.....	51
QUADRO 5: POSIÇÃO DOS TERMOPARES EM RELAÇÃO AO CENTRO DO CILINDRO.....	59
QUADRO 6: RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS TESTADOS.....	69
QUADRO 7: CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	75
QUADRO 8: RESULTADOS OBTIDOS DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA SONDA.....	81
QUADRO 9: VALORES CALCULADOS DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA O MÉTODO DA SONDA.....	85
QUADRO 10: CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	87
QUADRO 11: VALORES DAS TEMPERATURAS FINAIS UTILIZADAS PARA OS DIFERENTES LOTES TESTADOS.....	88
QUADRO 12: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA INTEIRA SECA.....	89
QUADRO 13: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA MOÍDA SECA.....	89
QUADRO 14: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA FUBÁ SECA.....	89
QUADRO 15: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA INTEIRA INTERMEDIÁRIA.....	90
QUADRO 16: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA MOÍDA INTERMEDIÁRIA.....	90
QUADRO 17: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA FUBÁ INTERMEDIÁRIA.....	90
QUADRO 18: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA INTEIRA ÚMIDA.....	91
QUADRO 19: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA MOÍDA ÚMIDA.....	91
QUADRO 20: RESULTADOS DO CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA SOJA FUBÁ ÚMIDA.....	91
QUADRO 21: VALORES DE K E D AJUSTADOS PELA UBS DOS MATERIAIS TESTADOS EM REGIME PERMANENTE.....	92
QUADRO 22: VALORES DOS ERROS RELATIVOS PARA A CONDUTIVIDADE PARA O MÉTODO DO REGIME PERMANENTE.....	93
QUADRO 23: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA INTEIRA SECA.....	94
QUADRO 24: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA MOÍDA SECA.....	95
QUADRO 25: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA FUBÁ SECA.....	95
QUADRO 26: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA INTEIRA INTERMEDIÁRIA.....	95
QUADRO 27: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA MOÍDA INTERMEDIÁRIA.....	96
QUADRO 28: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA FUBÁ INTERMEDIÁRIA.....	96
QUADRO 29: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA INTEIRA ÚMIDA.....	96
QUADRO 30: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA MOÍDA ÚMIDA.....	97
QUADRO 31: RESULTADOS DO CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA SOJA FUBÁ ÚMIDA.....	97
QUADRO 32: DADOS DOS EXPERIMENTOS - MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	98
QUADRO 33: RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS – MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	103
QUADRO 34: VALORES DE K CALCULADOS.....	109
QUADRO 35: VALOR DOS ERROS RELATIVOS PARA D.....	110
QUADRO 36: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA ENTRE OS MÉTODOS TESTADOS.....	111
QUADRO 37: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA ENTRE OS MÉTODOS TESTADOS.....	112
QUADRO 38: RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	113
QUADRO 39: RESULTADOS DOS TEORES DE UMIDADE.....	113
QUADRO 40: RESULTADOS DAS CONSTANTES TÉRMICAS PARA O MÉTODO DA SONDA.....	114

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE FUBÁ DE SOJA COM A TEMPERATURA.....	24
FIGURA 2: VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA COM A TEMPERATURA PARA A SOJA INTEIRA, MOÍDA E FUBÁ.....	24
FIGURA 3: VALORES DA CONDUTIVIDADE DO MILHO EM FUNÇÃO A POROSIDADE.....	25
FIGURA 4: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA DUAS VARIEDADES DE TRIGO COM DADOS DE LITERATURA EM RELAÇÃO AO CONTEÚDO DE UMIDADE.....	26
FIGURA 5: CONDUTIVIDADE TÉRMICA VERSUS CONTEÚDO DE UMIDADE PARA TRIGO, TRIGO COZIDO E SEM FIBRA.....	27
FIGURA 6: DIAGRAMA GENERALIZADO DO COMPORTAMENTO DE DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA EM RELAÇÃO AO CONTEÚDO DE UMIDADE.....	29
FIGURA 7: ESQUEMA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O MÉTODO DE FITCH.....	32
FIGURA 8: ESQUEMA DO EQUIPAMENTO PARA MEDIDAS DIRETAS DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA PROPOSTO POR DICKERSON (1965).....	33
FIGURA 9: ESQUEMA DA SONDA DUPLA PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DA CONDUTIVIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	37
FIGURA 10: ESQUEMA DA SONDA DE MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	39
FIGURA 11: ESQUEMA DO VASO DE PRESSÃO DA AMOSTRA E DA SONDA PARA MEDIR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	41
FIGURA 12: EQUIPAMENTO PARA MEDIR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	42
FIGURA 13: ESQUEMA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO POR JACKSON (1957).....	44
FIGURA 14: GRÁFICO EM QUE O VALOR DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA É EXTRAPOLADA PARA O PERÍODO ZERO.....	44
FIGURA 15: ESQUEMA DO EQUIPAMENTO PARA O MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	47
FIGURA 16: ASPECTO DAS DIFERENTES GRANULOMETRIAS DO MATERIAIS TESTADOS.....	51
FIGURA 17: EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE.....	53
FIGURA 18: ASPECTO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DA SOJA.....	54
FIGURA 19: DETALHAMENTO DA BASE (COTAS EM MM).....	55
FIGURA 20: ESQUEMA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA SONDA.....	57
FIGURA 21: ASPECTO DA SONDA E DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA UTILIZADO NO MÉTODO DA SONDA.....	57
FIGURA 22: ESQUEMA DE MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	59
FIGURA 23 E FIGURA 24: ASPECTO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O MÉTODO DO REGIME PERMANENTE.....	60
FIGURA 25: ASPECTO DOS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO.....	61
FIGURA 26: VISTA FRONTAL DO AQUECEDOR ELÉTRICO DE ACÚMULO, DO CILINDRO DE PVC E DA CÂMARA DE TEMPERATURA CONSTANTE.....	62
FIGURA 27: ASPECTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	63
FIGURA 28: ASPECTO FRONTAL DO CILINDRO DE PVC, DA CÂMARA DE TEMPERATURA CONSTANTE E DO TUBO DE COBRE, PODENDO SE OBSERVAR OS TERMOPARES.....	63
FIGURA 29: VISTA DA CÂMARA DE TEMPERATURA CONSTANTE E POSIÇÃO DOS TERMOPARES.....	64
FIGURA 30: VISTA FRONTAL DO AQUECEDOR ELÉTRICO DE ACÚMULO E DO CILINDRO DE PVC EM POSIÇÃO VERTICAL PARA COLOCAÇÃO E/OU RETIRADA DO MATERIAL TESTADO.....	64
FIGURA 31: VISTA DA BOMBA DE ÁGUA E DE UMA VÁLVULA SOLENÓIDE.....	66
FIGURA 32: ASPECTO DO QUADRO DE FORÇA COM AS CHAVES “ON-OFF, OS CONTROLADORES MICROPROCESSADORES DE CONTROLE DE TEMPERATURA E TIMER.....	67
FIGURA 33: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DENSIDADE REAL PARA AS DIFERENTES AMOSTRAS TESTADAS.....	70
FIGURA 34: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DENSIDADE APARENTE PARA OS DIFERENTES MATERIAIS TESTADOS.....	71
FIGURA 35: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DIÂMETRO EQUIVALENTE PARA OS DIFERENTES MATERIAIS TESTADOS.....	72
FIGURA 36: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE POROSIDADE PARA OS DIFERENTES MATERIAIS TESTADOS.....	73
FIGURA 37: COMPARAÇÃO DOS TEORES DE UMIDADE EM BASE ÚMIDA PARA AS DIFERENTES MATERIAIS TESTADOS PELO MÉTODO DO REGIME PERMANENTE.....	74
FIGURA 38: COMPARAÇÃO DOS TEORES DE UMIDADE EM BASE ÚMIDA PARA OS DIFERENTES MATERIAIS TESTADOS PELO MÉTODO DA SONDA E PELO MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	74
FIGURA 39: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA INTEIRA SECA.....	76
FIGURA 40: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA MOÍDA SECA.....	76
FIGURA 41: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA FUBÁ SECO.....	77

FIGURA 42: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA INTEIRA INTERMEDIÁRIA.	77
FIGURA 43: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA MOÍDA INTERMEDIÁRIA.....	78
FIGURA 44: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA FUBÁ INTERMEDIÁRIA.	78
FIGURA 45: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA INTEIRA ÚMIDA.	79
FIGURA 46: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA MOÍDA ÚMIDA.	79
FIGURA 47: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO LN DO TEMPO PARA A SOJA FUBÁ ÚMIDA.	80
FIGURA 48: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE TÉRMICA E O CONTEÚDO DE UMIDADE PARA O MÉTODO DA Sonda.	82
FIGURA 49: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE TÉRMICA E O CONTEÚDO DE UMIDADE PARA O MÉTODO DA Sonda.	82
FIGURA 50: RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA O DIÂMETRO MÉDIO DA PARTÍCULA PARA O MÉTODO DA Sonda.	83
FIGURA 51: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE E A POROSIDADE PARA O MÉTODO DA Sonda.	84
FIGURA 52: RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA E O CONTEÚDO DE UMIDADE PARA O MÉTODO DA Sonda.	85
FIGURA 53: RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA E A POROSIDADE PARA O MÉTODO DA Sonda.	86
FIGURA 54: RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA E O DIÂMETRO MÉDIO PARA O MÉTODO DA Sonda.	86
FIGURA 55: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA INTEIRA SECA.	98
FIGURA 56: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA MOÍDA SECA.	99
FIGURA 57: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA FUBÁ SECA.	99
FIGURA 58: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA INTEIRA INTERMEDIÁRIA.	100
FIGURA 59: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA MOÍDA INTERMEDIÁRIA.	100
FIGURA 60: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA FUBÁ INTERMEDIÁRIA.	101
FIGURA 61: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA INTEIRA ÚMIDA.	101
FIGURA 62: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA MOÍDA ÚMIDA.	102
FIGURA 63: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A SOJA FUBÁ ÚMIDA.	102
FIGURA 64: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA INTEIRA SECA.	104
FIGURA 65: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA MOÍDA SECA.	104
FIGURA 66: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA FUBÁ SECA.	105
FIGURA 67: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA INTEIRA INTERMEDIÁRIA.	105
FIGURA 68: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA MOÍDA INTERMEDIÁRIA.	106
FIGURA 69: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA FUBÁ INTERMEDIÁRIA.	106
FIGURA 70: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA INTEIRA ÚMIDA.	107
FIGURA 71: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA MOÍDA ÚMIDA.	107
FIGURA 72: DADOS EXPERIMENTAIS COMPARADOS COM VALORES PREDITOS PARA A SOJA FUBÁ ÚMIDA.	108

NOMENCLATURA

A	Amplitude de temperatura	[°C]
A_1	Amplitude de temperatura do cano de cobre	[°C]
A_2	Amplitude de temperatura ambiente	[°C]
B	Raízes positivas da equação transcendental de Bessel	
C	Constante de Euler	[adimensional]
C_p	Calor específico do material a pressão constante	[J/kg °C]
D	Difusividade térmica	[m ² /s]
D_w	Difusividade térmica da água a temperatura desejada	[m ² /s]
D_e	Difusividade térmica efetiva	[m ² /s]
d	Diâmetro da partícula	[m]
d_p	Diâmetro médio da partícula	[m]
d_{pi}	Média das aberturas das malhas entre as duas peneiras adjacentes	[m]
E	Erro relativo	
F	Frequência	[1/s]
G	Constante da equação da solução geral	
k	Condutividade térmica	[W/m °C]
k_i	Condutividade térmica do ar	[W/m °C]
k_w	Condutividade térmica da água	[W/m °C]
$J_{0(x)}$	Função de Bessel de primeiro tipo de ordem zero e argumento x	
L	Espessura	[m]
ln	Logaritmo neperiano	[adimensional]
H	Diferença entre o raio externo e o raio interno	[m]

M	Massa	[kg]
P	Período	[s]
Q	Quantidade de calor fornecido	[Watts]
Q_v	Quantidade de calor fornecido para evaporação de um líquido	[Watts]
q	quantidade de calor fornecido por unidade de comprimento	[Watts/m]
R	Raio	[m]
R_1	Raio do cano de cobre	[m]
R_2	Raio externo do cilindro	[m]
r	Distância radial	[m]
S	Área	[m ²]
T	Temperatura	[°C]
T_1	Temperatura do cano de cobre	[°C]
T_2	Temperatura ambiente	[°C]
T_r	Temperatura de referência	[°C]
$T(t)$	Componente da variável δ	
TM	Temperatura Média	[°C]
t	Tempo	[s]
$Y_{0(x)}$	Função de Bessel de segundo tipo de ordem zero e argumento x	
X_a	Conteúdo de Umidade	[%]
X_c	Teor de carboidratos	[%]
X_g	Teor de gordura	[%]
X_p	Teor de proteína	[%]
$X(x)$	Componente da variável δ	
xi	Fração retida na peneira	

x, y, z	Sistema de coordenadas cartesianas	[mm]
U B S	Umidade em base seca	[kg/kg]
U B U	Umidade em base úmida	[kg/kg]
V	Volume	[m ³]
v	Velocidade constante de aquecimento	[°C/s]

Gregas

β	$\frac{r}{2\sqrt{Dt}}$	[adimensional]
ρ	Densidade do material	[kg/m ³]
ϕ	Co-latitude	[grau]
θ	Longitude	[grau]
δ	Variável de temperatura (T-TM)	[°C]
$\dot{\delta}$	Diferencial da temperatura em função do tempo	[°C/s]
ε	Porosidade	[adimensional]
v	$v = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$, adimensional de temperatura	[adimensional]

RESUMO

Na determinação das constantes térmicas de materiais granulares pelo método do regime permanente, a matéria fluida flui da superfície quente para a fria, transportando calor. O método do equilíbrio dinâmico proposto por JACKSON (1957) foi utilizado e comparado com os métodos do regime permanente (steady state method) e com o método transiente da fonte linear de calor (line heat source method).

A equação geral de transferência de calor expressa em coordenadas cilíndricas em condições harmônicas de contorno foi aplicada para o método do equilíbrio dinâmico. Um equipamento consistindo de dois cilindros concêntricos foi projetado e construído para gerar as condições experimentais prescritas pelo modelo analítico. Neste equipamento foi promovida a circulação de água quente e fria no interior do cilindro interno, simulando as condições harmônicas de contorno. Amostras de soja com diferentes granulometrias e conteúdos de umidade foram colocadas entre as superfícies concêntricas, mantendo a outra superfície também em condições harmônicas de contorno.

A análise foi feita após atingir o equilíbrio e as condições de equilíbrio dinâmico terem sido estabelecidas. Os outros métodos foram conduzidos com equipamentos tradicionais descritos pela literatura. Os resultados obtidos indicaram que os valores das constantes térmicas são influenciados pelo teor de umidade, diâmetro médio da partícula e porosidade da soja, o método fonte linear de calor gerou resultados condizentes com os encontrados em literatura, o método do regime permanente apresentou bons resultados para o material seco e grande variação para materiais com alto teor de umidade, a componente transiente do equilíbrio dinâmico gerou dados semelhantes aos do método da sonda.

O equipamento desenvolvido e construído apresentou facilidade na condução dos experimentos, tanto em relação a calibração das condições experimentais desejadas, como em relação a obtenção dos dados experimentais. Ficando evidente que o método do equilíbrio dinâmico pode ser aplicado à proposta de JACKSON (1957), no sentido de obter as constantes térmicas de grãos úmidos.

ABSTRACT

In the determination of thermal constants of granular material by steady state methods fluid matter flows from the hot to the cold surface, transporting heat. The quasy steady state method proposed by Jackson (1957) is then explored and compared with steady state, line heat source as well as transient methods. The general heat conduction equation expressed in cylindrical coordinates under harmonic boundary conditions was applied to the phenomena. An apparatus consisting of two concentric cylinders was design and constructed to generate the experimental conditions prescribed by the analytical model. Hot and cold water circulating in the inner cylindrical surface simulated the harmonic boundary conditions. Soybean samples were placed between the concentric surfaces maintaining the outer surface also at harmonic boundary condition. The analysis was carried after the equilibrium had been reached and the quasy-steady state condition has been set. The remaining methods were carried with traditional apparatus as described by the literature. Results obtained by the methods mentioned above showed good agreement with those reported by the literature.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades térmicas de grãos e sementes é essencial para o desenvolvimento das ciências agrícolas e de alimentos, podendo ser empregadas a uma variedade de objetivos, tais como, predição da taxa de secagem ou distribuição de temperatura em grãos úmidos sujeitos a diferentes condições de secagem, aquecimento e resfriamento, otimização do desempenho de equipamentos de transferência de calor, reidratação, aparatos de esterilização, etc.

Segundo SAKYAMA e YANO (1994), o conhecimento da condutividade térmica efetiva de materiais biológicos é importante, não somente para desenho de processos, mas também, para predição e controle das várias mudanças que ocorrem nesses materiais durante o processamento térmico.

Segundo TAVMAN, TAVMAN e EVCIN (1997), com o aumento da mecanização e a introdução de novos processos de secagem e armazenamento de grãos tem aumentado a importância do cálculo da transferência de massa e calor com a finalidade de se otimizar e facilitar esses processos. Muitos dos problemas encontrados na secagem e armazenagem podem ser analisados utilizando-se as equações básicas de transferência de calor. No entanto, para o uso dessas equações, é necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos grãos.

A preservação da estrutura e do valor nutritivo dos grãos concorrem como fator limitante dos processos de armazenamento e a secagem de grãos, considerados por TAVMAN e TAVMAN(1998), como os principais da atividades da agroindústria. Muhlbauer e Christ citados por TAVMAN e TAVMAN (1998), descrevem e quantificam os danos na estrutura e o valor nutricional dos grãos em função da temperatura e tempo de secagem. Portanto, para se garantir condições apropriadas de secagem e armazenamento de grãos é necessário o conhecimento das propriedades termofísicas desses materiais, destacando a difusividade e condutividade térmica, peso específico e calor específico como particularmente importantes na predição da distribuição de temperatura no material granular, tomando como base teórica os princípios de transferência de calor.

De acordo com SHARMA e THOMPSON (1973), existem vários métodos para se avaliar as propriedades térmicas de grãos e sementes úmidos. No entanto, esses métodos geram aproximações grosseiras dos valores reais, indicando uma necessidade de investigar novos métodos, bem como suas reais contribuições nos processos de secagem e estocagem de grãos e sementes.

As propriedades térmicas, tais como a difusividade e condutividade térmicas, podem variar de acordo com a natureza do produto, variedade, teor de umidade e temperatura do processo (KAZARIAN e HALL, 1965). De acordo com TAVMAN e TAVMAN (1998), existem muitos fatores que podem interferir nas propriedades térmicas dos grãos, dentre esses, se destacam a composição dos grãos, peso específico, porosidade, tamanho dos grãos e estrutura.

Segundo ROSSI (1980), os grãos se constituem num dos principais alimentos fontes de proteínas e carboidratos, notadamente para as populações de países nitidamente mais carentes. Sob esse aspecto, a soja é apontada como uma das principais fontes de óleo comestível sendo o resíduo resultante da extração uma das mais ricas fontes de proteínas para a indústrias alimentícias e de rações.

A soja ocupou na safra 98/99 uma área de 12.995.200 ha no Brasil, com uma produção de 30.764.900 toneladas, isto equívale a uma média 2.367 kg/ha (CONAB, 2000), sendo uma das culturas agrícolas mais importantes do país.

A soja tem o potencial de se tornar uma das mais importantes culturas para alimentação. Este material possui alto conteúdo de proteína, é rica em óleo e tem alto rendimento por área. Entretanto, a soja crua contém um inibidor denominado tripsina, o qual afeta o pâncreas, causando problemas de indigestão, hemofilia e eventualmente a morte, especialmente em animais jovens monogástricos. Este inibidor pode ser destruído por tratamento térmico da soja. A eficiência do tratamento térmico depende da relação entre o tempo, temperatura e umidade da soja. Portanto, para desenvolver um tratamento térmico econômico, com ótima eficiência e que mantenha os valores nutritivos, é necessário conhecer as propriedades térmicas da soja (JASANSKY e BILANSKI, 1973, e WATTS e BILANSKI, 1973).

No estudo do comportamento térmico de grãos tem se assumido como apropriado a equação geral da difusão de calor. Isto implica em afirmar que os grãos formam um meio homogêneo, isotrópico e contínuo. Entretanto, os grãos formam espaços vazios entre si onde a matéria fluída circula (ar, vapor de água e outros gases) transportando calor. Para grãos secos a quantidade de calor transportado por convecção pode ser considerado desprezível e as constantes térmicas podem ser determinadas por métodos do regime estacionário (steady state methods). O problema surge na determinação das constantes térmicas de grãos úmidos onde o fenômeno da convecção atua com grande intensidade. Nesse caso a aplicação de métodos de regime estacionário, irá gerar valores errôneos devido ao pressuposto assumido que a transferência de calor se dá exclusivamente por condução.

O experimento descrito por JACKSON (1957) relata o estudo e obtenção da constantes térmicas de solos úmidos, onde uma lâmina de solo foi considerada como um corpo semi infinito com condições de contorno estáveis. A lâmina de solo úmido foi submetida a diversos períodos de variação de temperatura em uma de suas superfícies. A equação da difusão de calor foi analisada depois que o equilíbrio dinâmico foi alcançado. Para o cálculo da difusividade de solos úmidos, utilizou-se a variação decrescente do período de temperatura que extrapolado ao valor zero o efeito da convecção é anulado, simulando uma não migração da umidade. Nesse contexto, a extrapolação da curva onde o período é zero resulta na obtenção do valor real para a difusividade térmica do solo úmido.

Dessa maneira, o conhecimento de métodos que possibilitem a obtenção de valores mais acurados das constantes térmicas dos grãos é de grande importância.

Este trabalho tem como objetivo obter e analisar as constantes térmicas de grãos de soja com diferentes umidades e granulometrias através de três métodos distintos: o método do Regime Permanente (steady state method), da Fonte Linear de Calor (probe method) e do equilíbrio dinâmico (quasi-steady state method).

Para que o fenômeno de transferência de calor em regime de equilíbrio dinâmico fosse discutido de forma teórica e analítica, e fosse possível de ser reproduzido experimentalmente, houve a necessidade de se desenvolver e construir um equipamento que permite que a migração da umidade se mantenha a valores mínimos através da variação de temperatura no interior da amostra.

Os resultados obtidos das propriedades térmicas de grãos de soja pelos três métodos utilizados foram comparados entre si e com resultados encontrados em literatura com o intuito de se avaliar a precisão dos métodos.

Dentre os motivos pelos quais a soja foi selecionada para o presente estudo, ressalta-se o seu valor nutritivo e a sua larga produção no Brasil.

II. TEORIA BÁSICA

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo visa discorrer sobre soluções analíticas da equação geral da difusão de calor, ressaltando os casos estacionário, transiente e de equilíbrio dinâmico, sendo este último conhecido como “quasy-steady state”. A teoria denominada por Fonte Linear de Calor (Line Heat Source), a qual descreve fenômenos transientes, será tratado à parte, dadas as particularidades que a caracteriza.

Convém ressaltar que essa divisão didática da teoria da condução de calor foi assim subdividida para melhor encaminhar a revisão de literatura, a qual também está subdividida sob a mesma tônica.

2.2. PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DE FOURIER

A transmissão de calor é o processo que se identifica com a transmissão de energia entre dois sistemas diferentes, como resultado da diferença de temperatura entre eles. A literatura menciona três tipos distintos de transmissão de calor, denominados condução, radiação e convecção, os quais podem ocorrer de forma combinada ou isoladamente.

Na radiação o calor flui de um corpo de alta temperatura para um de mais baixa, mesmo quando estão separados no espaço, podendo ainda existir vácuo ente eles, transmitindo calor pela propagação de ondas luminosas ou eletromagnéticas.

A convecção é um processo de transporte de energia através da movimentação da massa fluida, sendo mais importante como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido ou entre fluidos.

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de mais baixa temperatura dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou, entre meios diferentes em contato físico direto. O calor passa através do corpo pela transferência física de elétrons livres e pela vibração de átomos e moléculas, e cessa quando a temperatura em todos os pontos do corpo atinge o equilíbrio térmico.

Se um sistema é perturbado pelo efeito de um gradiente de temperatura (dT/dx), esta perturbação tende a ser eliminada por um fluxo de calor que ocorre através da transferência de energia da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura no sentido de diminuir este gradiente. A energia desse modo é transferida por condução e a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura, (HOLMAN, 1983).

A condutividade térmica inserida nesse contexto é uma propriedade termofísica do material a qual descreve a taxa em que o fluxo de calor passa através deste sob influência de um gradiente térmico.

A difusividade térmica indica a medida da variação da temperatura do material submetido a um processo de resfriamento ou aquecimento. No cálculo desse coeficiente é relacionado a condutividade térmica (k), a densidade (ρ) e o calor específico (C_p) do material.

O estudo analítico da transmissão de calor foi proposta pelo cientista francês J. B. J. Fourier, em 1822, onde se expressa um fluxo de calor (Q) por unidade de área (S), gerado por um gradiente de temperatura por unidade de espaço linear (dT/dx). Definindo a constante de proporcionalidade (k), conhecida como condutividade térmica, a primeira Lei de Fourier pode ser expressa como (CHAPMAN, 1967):

$$Q = -k S \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

O sinal negativo da equação indica que o calor é transferido em sentido decrescente do gradiente de temperatura. Deste modo, qualquer método para determinar o valor da condutividade térmica (k), em regime permanente, requer o conhecimento de uma distribuição de temperatura, com medida simultânea de fluxo de calor.

A difusividade térmica é mais utilizada em situações onde a transferência de calor ocorre em regime transiente e é descrita como:

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

2.3. EQUAÇÃO GERAL DA DIFUSÃO DE CALOR

A equação geral da difusão ou condução de calor pode ser apresentada sob várias formas, dependendo do regime que se considera e também o sistema de coordenadas empregado. Para os casos transientes devem ser especificadas a condição inicial e as condições de contorno. Para os demais casos, ou seja regime permanente e regime em equilíbrio dinâmico o parâmetro tempo é considerado tendendo ao infinito, não havendo necessidade de se especificar a condição inicial e sim as de contorno.

Deste modo a equação geral da difusão de calor, expressa em coordenadas cartesianas, considerando um regime transiente, sem a geração interna de calor, pode ser expressa da seguinte forma (CHAPMAN, 1967):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Essa mesma equação expressa em coordenadas cilíndricas tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

E a equação expressa em coordenadas esféricas tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right] \quad (5)$$

Os casos denominados por regime permanente também são expressos em coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas.

A equação geral da difusão de calor em regime permanente, expressa em coordenadas cartesianas tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

Ou então, expressa em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

Ou expressa em coordenadas esféricas como:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = 0 \quad (8)$$

2.4. CONDUÇÃO DE CALOR EM PLACAS HOMOGÊNEAS INFINTAS, EM REGIME PERMANENTE

A solução para uma placa homogênea infinita de espessura L, em regime permanente, submetida às condições de contorno:

$$\text{em } (x = 0; T = T_1) \text{ e } (x = L; T = T_2)$$

Temos:

$$k = \frac{qL}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

Segundo o mesmo autor, se juntamente com a placa cujo material pretende-se determinar a condutividade térmica (amostra) for colocada uma placa de condutividade térmica conhecida (padrão), a equação (9) torna-se:

$$k = \frac{L_a}{L_p} \left[\frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \right] k_p \quad (10)$$

Onde (a) indica amostra e (p) indica padrão.

2.5. CONDUÇÃO RADIAL DE CALOR ENTRE DUAS SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS CONCÊNTRICAS, EM REGIME PERMANENTE

Para o caso de um cilindro oco, ou seja, duas superfícies cilíndricas concêntricas, onde o calor é conduzido apenas no sentido radial, mantendo-se as temperaturas das duas superfícies interna e externa constantes, respectivamente a T_1 e T_2 , a solução da equação (7) é, sendo r_1 é o raio interno e r_2 é o raio externo (CHAPMAN, 1967):

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (11)$$

Para um tubo oco em uma condição de transferência de calor por condução em estado estacionário, de comprimento L , a área para escoamento de calor radial no sistema é dada por :

$$S = 2\pi L \quad (12)$$

E a substituição na equação (1) conduz a:

$$Q = -(2\pi L)k \frac{dT}{dr} \quad (13)$$

Para a seção do tubo, as condições de contorno são:

Para $(r = r_1; T = T_1)$ e $(r = r_2; T = T_2)$

Resolvendo-se a equação (11) temos:

$$Q = \frac{2\pi k L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (14)$$

Em cilindros coaxiais verticais em regime permanente com as condições (GUBULIN e FREIRE, 1990, PARK, ALONSO e NUNES, 1999 e MOHSENIN, 1980):

em $(r = r_1, T = T_1)$ e $(r = r_2; T=T_2)$, obtém-se:

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L (T_1 - T_2)} \quad (15)$$

2.6. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA VAPORIZAÇÃO EM REGIME PERMANENTE.

Neste método uma pequena amostra do espécime testado é colocada entre duas placas de prata, uma em contato com um líquido G em seu ponto de ebulição, enquanto a outra placa permanece em contato com um líquido I, abaixo do seu ponto de ebulição. O calor é transferido através da amostra vaporizando o líquido I. Conhecendo-se o tempo necessário para vaporizar a unidade de volume do líquido I se determina a condutividade térmica pela equação (MOHSENIN, 1980):

$$k = \frac{Q_v}{t} (T_a - T_b) \frac{L}{S} \quad (16)$$

2.7. CONDUÇÃO RADIAL DE CALOR EM UM CILINDRO INFINITO EM REGIME TRANSIENTE

A condução radial de calor em um cilindro infinito em Regime Transiente é descrita por CARSLAW e JAEGER (1959), para o caso geral com a condição da superfície em função do tempo e a temperatura inicial em função do raio, $f(r)$, temos:

$$f(r) = G_1 J_0(B_1 r) + G_2 J_0(B_2 r) + \dots, \quad (17)$$

Aonde B_1, B_2, \dots , são raízes positivas de:

$$J_0(BR) = 0 \quad (18)$$

Multiplicando-se os dois lados da equação (17) por $r J_0(B_n r)$, e integrando-se de 0 até R, obtém-se:

$$\int_0^R r J_0(B_m r) J_0(B_n r) dr = 0, \quad m \neq n, \quad (19)$$

$$\int_0^R r J_0(B_m r) J_0(B_n r) dr = \frac{1}{2} R^2 [J_0'(R B_n)]^2 = \frac{1}{2} R^2 J_1^2(R B_n) \quad (20)$$

Se o resultado $J_0'(z) = -J_1(z)$ for utilizado, encontra-se:

$$G_n = \frac{2}{R^2 J_1^2(R B_n)} \int_0^R r f(r) J_0(r B_n) dr. \quad (21)$$

Portanto a equação geral final é:

$$T - T_{\infty} = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-DB} \frac{J_0(r B_n)}{J_1^2(R B_n)} \int_0^R r f(r) J_0(r B_n) dr \quad (22)$$

Para o caso particular com a temperatura inicial constante, isto é $f(r) = V = T_0 - T_{\infty}$, obtém-se:

$$T - T_{\infty} = \frac{2V}{R} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-DB} \frac{J_0(r B)}{B J_1^2(R B)} \quad (23)$$

2.8. TEORIA DA FONTE LINEAR DE CALOR E DA FONTE PONTUAL DE CALOR

Essas teorias tem sido tratadas em destaque dos demais casos por diversos autores. Porém, os autores mais didáticos sugerem que tais teorias não passam de variações de soluções gerais da equação geral da difusão de calor para regime transiente.

Na verdade o que se denomina Fonte Linear de Calor ou fonte Pontual de Calor são tomadas como casos específicos de condições de contorno. Em geral a condição inicial é tomada como sendo a temperatura igual a zero. Para a maioria dos casos, o meio é considerado como infinito.

DICKERSON (1965) propôs uma metodologia onde a temperatura da amostra é proporcional ao tempo seguindo uma função linear crescente, tendo como condição inicial a velocidade (v) de aquecimento em todos os pontos de um cilindro infinito e em regime transiente constante, minimizando a dificuldade de se satisfazer as condições de contorno e evitando com o tempo, variações nas diferenças de temperatura durante o experimento. Aplicando-se essas condições de contorno temos:

$$T = T_s \quad \text{a} \quad t > 0; r = R$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad \text{a} \quad t > 0; r = 0$$

$$\text{onde,} \quad T_s - T = \frac{v}{4D} (R^2 - r^2) \quad (24)$$

Para $r = 0$ a equação (24) torna-se:

$$T_s - T = \frac{vR^2}{4D} \quad (25)$$

Utilizando o método, e considerando um ponto à fonte linear, a elevação de temperatura T_1 e T_2 pode ser expressa por (NIX et al., 1967):

$$T = \frac{q}{2\pi k} \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-\beta^2) d\beta}{\beta} \quad (26)$$

Definindo-se a integral da equação (26) temos:

$$T = \frac{q}{2\pi k} \left[\frac{-C}{2} - \ln\beta + \frac{\beta^2}{2 \times 1!} - \frac{\beta^4}{4 \times 2!} + \frac{\beta^6}{6 \times 3!} - \dots \right] \quad (27)$$

Onde, para pequenos valores de (r) , isto é $\beta < 0.16$, a integral da exponencial da equação (26), pode ser aproximada com menos que 1% de erro por (INGERSOLL, ZOBEL e INGERSOLL, 1954, MOHSENIN, 1980):

$$T = \frac{q}{2\pi k} \left[\ln\left(\frac{1}{\beta}\right) - \frac{C}{2} \right] \quad (28)$$

MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996), demonstraram a relação do parâmetro β com o tempo de duração do teste (t) , com a difusividade térmica da amostra (D) , e a distância do sensor de temperatura em relação a fonte de calor (r) . como segue na equação:

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{(Dt)}} \quad (29)$$

Através da equação acima pode-se calcular o tamanho do r para o tubo da sonda. Nesta equação, o valor do parâmetro β é determinado a partir do erro específico aceitável. O quadro (1) apresenta o valor de β para os diversos valores de erro que são calculados através da seguinte equação:

$$E = 100 \left[\frac{\Delta T_1 - \Delta T}{\Delta T_1} \right] \quad (30)$$

Quadro 1: Valores dos erros calculados em função dos valores de β .

β	E (%)	β	E (%)
0,02	0,006	0,17	0,958
0,04	0,027	0,18	1,114
0,06	0,071	0,19	1,287
0,08	0,143	0,20	1,477
0,10	0,247	0,25	2,727
0,12	0,390	0,30	4,587
0,13	0,478	0,35	7,241
0,14	0,578	0,40	10,916
0,15	0,691	0,45	15,892
0,16	0,817	0,50	22,523

Fonte: MURAKAMI et al. (1996).

Considerando um ponto **P** próximo a fonte linear de calor (ou seja a distância entre o ponto e a fonte é desprezível), e entre tempo t_1 e t_2 , a solução da equação geral da difusão de calor, pelo regime transiente (DICKERSON, 1965, PARK, MURR e SALVADEGO, 1997(a), JASANSKY e BILANSKI, 1973, INGERSOLL, ZOBEL e INGERSOLL, 1954, CHANG, 1986 e por NIX et. al. 1967) é:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (31)$$

Portanto, se a temperatura, tempo e potência da fonte são conhecidas, a condutividade térmica pode ser calculada a partir da equação (31).

2.9. CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA DIMENSÃO EM COORDENADAS CARTESIANAS SOB REGIME DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

A equação geral da condução de calor em sólidos é (CHAPMAN, 1967 e TERESO, 1983):

$$Q = -D \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (32)$$

A equação de Fourier para a condução de calor em uma dimensão é dada por:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (33)$$

Assumindo-se que k , ρ e C_p são constantes e sendo a difusividade uma função da condutividade térmica dada pela relação (33), a equação de condução de calor se torna simplificada :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (34)$$

Como condição de contorno, na superfície de um sólido (solo, grãos, etc), onde $x=0$, propõe-se uma variação sinusoidal da temperatura para um período, a oscilação irá ocorrer entre um valor máximo e um mínimo ($T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$), respectivamente. Definindo a temperatura média na média da superfície por T_M , tem-se que:

$$T_M = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \quad (35)$$

Definindo uma nova variável temperatura, δ , como sendo:

$$\delta = T - T_M \quad (36)$$

a condição de contorno para a superfície do sólido pode ser expressa por:

$$\delta_{x=0} = \delta_0 \text{sen}(2\pi F t) \quad (37)$$

para δ_0 = amplitude da temperatura na superfície do sólido

$$\delta_0 = \frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}}{2} \quad (38)$$

Rearranjando a equação de condução de calor em termos de nova variável de temperatura δ e assumindo T_M constante, tem-se:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} \quad (39)$$

Representando a solução desta equação como produto de duas diferentes funções, sendo cada qual com uma variável independente denominado método de separação das variáveis tem-se:

$$\delta = T(x) X(x) \quad (40)$$

Substituindo-se na equação de condução de calor (39):

$$\frac{X dT}{dT} = D T \frac{d^2 x}{dx^2} \quad (41)$$

E agora rearranjando, tem-se que:

$$\frac{1}{D} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{x} \frac{d^2x}{dx^2} = \pm i\beta^2 \quad (42)$$

Os dois resultados desta equação são:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \pm i\beta^2 D T \quad (43)$$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = \pm i\beta^2 X \quad (44)$$

A solução para δ é (CHAPMAN, 1967):

$$\delta = J e^{\frac{-\beta x}{\sqrt{2}}} \left[B e^{i\left(\beta^2 D t - \frac{\beta x}{\sqrt{2}}\right)} \right] + J' e^{\frac{-\beta x}{\sqrt{2}}} \left[B' e^{-i\left(\beta^2 D t - \frac{\beta x}{\sqrt{2}}\right)} \right] \quad (45)$$

da identidade $e^{\pm i\beta} = \cos\beta \pm i \operatorname{sen}\beta$, a solução da equação (45) é:

$$\delta = e^{\frac{-\beta x}{\sqrt{2}}} \left[G \cos\left(\beta^2 D t - \frac{\beta x}{\sqrt{2}}\right) + H \operatorname{sen}\left(\beta^2 D t - \frac{\beta x}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (46)$$

Voltando à condição de contorno, para $x=0$ (equação 37) temos:

$$\delta_{x=0} = \delta_0 \operatorname{sen}(2\pi F t) \quad (47)$$

$$\delta_0 \operatorname{sen}(2\pi F t) = G \cos(\beta^2 D t) + H \operatorname{sen}(\beta^2 D t) \quad (48)$$

de onde se conclui que:

$$G=0$$

$$H=\delta_0$$

$$\beta^2 = \frac{2\pi F}{D}$$

A solução para a variação da temperatura com o tempo será:

$$\delta = \delta_0 e^{-x\sqrt{\frac{(\pi F)}{D}}} \operatorname{sen}\left(2\pi F t - x\sqrt{\frac{(\pi F)}{D}}\right) \quad (49)$$

Analisando-se para uma dada distância da superfície, nota-se que a variação da temperatura é periódica, com o mesmo período da superfície, e que a amplitude decresce exponencialmente com a profundidade.

A amplitude (A) para uma distância (x) da superfície é:

$$A_x = \delta_0 e^{-x \sqrt{\frac{\pi F}{D}}} \quad (50)$$

Sendo:

$$\omega = 2\pi F \quad (51)$$

$$a^2 = \frac{\pi F}{D} \quad (52)$$

A equação (49) fica então simplificada:

$$\delta(x, t) = \delta_0 e^{-ax} \text{sen}(\omega t - ax) \quad (53)$$

Das equações (36) e (53) chega-se à equação que fornece o perfil de temperatura do sólido, para profundidade x e tempo t:

$$T = \delta_0 e^{-ax} \text{sen}(\omega t - ax) + TM \quad (54)$$

Das equações (51), (52) e (53), pode-se determinar o valor da difusividade térmica. Definindo o tempo de defasagem ou “time-lag”, como o tempo de ocorrência da temperatura máxima ou mínima entre profundidades correspondentes, pode-se estimar o valor de D.

Como a temperatura δ , para uma profundidade x, atinge um valor máximo ou mínimo quando $\frac{\partial \delta}{\partial t} = 0$,

$$\text{onde } \dot{\delta} = \frac{\partial \delta}{\partial t}, \quad (55)$$

$$\text{logo, } \dot{\delta} = -\delta_0 e^{-ax} \omega \cos(\omega t - ax) = 0 \quad (56)$$

portanto, $\dot{\delta} = 0$ somente para:

$$\cos(\omega t - ax) = 0 \quad (57)$$

$$\omega t - ax = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad (58)$$

Somente o tempo de ocorrência de máxima e mínima temperatura será:

$$t = \frac{1}{\omega} \left[ax + (2n + 1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (59)$$

A defasagem, ou “time-lag”, entre tempos de ocorrência de temperatura máxima ou mínima para os pontos x_1 e x_2 podem ser representados como:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \left[ax_1 + (2n+1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (60)$$

$$e, t_2 = \frac{1}{\omega} \left[ax_2 + (2n+1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (61)$$

Como o tempo de defasagem é a diferença entre estes tempos de ocorrência tem-se:

$$L = t_2 - t_1 = \frac{1}{\omega} [a(x_2 - x_1)] \quad (62)$$

$$L = (x_2 - x_1) \sqrt{\frac{\pi F}{D}} \left(\frac{1}{2\pi F} \right) \quad (63)$$

$$L = (x_2 - x_1) \sqrt{\frac{1}{4D\pi F}} \quad (64)$$

Através da diferença de tempo de ocorrência de temperatura máxima e mínima entre dois pontos, a difusividade térmica pode ser calculada pela relação:

$$D = \frac{(x_2 - x_1)^2}{4\pi F L^2} \quad (65)$$

Uma outra maneira de se determinar a difusividade térmica, é pela razão das amplitudes à diferentes profundidades. Da equação (50) temos a amplitude para uma distância x . Sendo A_1 e A_2 as amplitudes para a profundidade x_1 e x_2 respectivamente:

$$A_1 = \delta_0 e^{-ax_1} \quad (66)$$

$$A_2 = \delta_0 e^{-ax_2} \quad (67)$$

Dividindo a equação (66) pela equação (67), obtém-se:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{e^{-ax_1}}{e^{-ax_2}} \quad (68)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{-ax_2} e^{-ax_1} \quad (69)$$

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = a(x_1 - x_2) \quad (70)$$

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \sqrt{\frac{\pi F}{D}} (x_2 - x_1) \quad (71)$$

Deste modo, a difusividade pode ser expressa por:

$$D = \pi F \left[\frac{(x_2 - x_1)}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} \right] \quad (72)$$

2.10. CONDUÇÃO RADIAL DE CALOR ENTRE DUAS SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS CONCÊNTRICAS EM REGIME DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

Considerando-se a transferência de calor ocorrendo exclusivamente por condução em direções radiais, e nenhum calor sendo gerado pelo sólido, a equação de calor expressa em coordenadas cilíndricas tem a seguinte forma (CHAPMAN, 1967 e DAL FABBRO e NUNES, 1999):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (73)$$

Se nesta situação o tempo for suficientemente grande, a condição inicial do experimento não irá afetar a distribuição da temperatura.

Considerando-se para esta situação com as condições de contorno de $T_2(t)$ ser mantida constante e igual a média da amplitude de $T_1(t)$ e a temperatura $T_1(t)$ ser mantida variando da seguinte forma como segue abaixo:

$$T_1(t) = A_1 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{P}\right) \quad \text{para } r = r_1 \quad (74)$$

$$T_2(t) = \text{constante} \quad \text{para } r = r_2 \quad (75)$$

Tais condições de contorno se referem a um cilindro oco cujas dimensões são r_1 , (raio interno) e r_2 , (raio externo), não se considerando o comprimento pois a condução de calor se dá no sentido radial.

Segundo ÖZISIK (1968), a solução analítica deve considerar as seguintes definições:

$$A(B,t) = D \left[R_1 \frac{dK_0(B,r)}{dr} \Big|_{r=R_1} T_1(t') - R_2 \frac{dK_0(B,r)}{dr} \Big|_{r=R_2} T_2(t') \right] \quad (76)$$

onde:

$$K_0(B, r) = \frac{\pi B J_0(B, R_2) Y_0(B, R_2) J_0(B, r) Y_0(B, R_2) - J_0(B, R_2) Y_0(B, r) J_0(B, R_1)}{[2 J_0^2(B, R_1) - J_0^2(B, R_2)]^{\frac{1}{2}} J_0(B, R_2) Y_0(B, R_2)} \quad (77)$$

onde B representa as raízes positivas da equação transcendental de Bessel dada por:

$$U(B, r) = Y_0(B, R_1) J_0(B, R_2) - Y_0(B, R_2) J_0(B, R_1) \quad (78)$$

e $J_0(x)$ e $Y_0(x)$ são funções de Bessel do primeiro e segundo tipo e de ordem zero. Neste caso, a incógnita (x) foi substituída pelo valor de (B, r).

Os valores das derivadas podem ser definidos como:

$$\left. \frac{dK_0(B, r)}{dr} \right|_{r=R_2} = \frac{-2 J_0(B, R_1)}{2[J_0^2(B, R_1) - J_0^2(B, R_2)]^{\frac{1}{2}} R_2} \quad (79)$$

$$\left. \frac{dK_0(B, r)}{dr} \right|_{r=R_1} = \frac{-2 J_0(B, R_2)}{2[J_0^2(B, R_2) - J_0^2(B, R_1)]^{\frac{1}{2}} R_1} \quad (80)$$

A solução particular desta equação é apresentada por DAL FABBRO e NUNES (1999), como:

$$T(r, t) = \sum_B \frac{\exp(-DB^2 t') \pi B J_0(B, R_1) [J_0(B, r) Y_0(B, R_2) - J_0(B, R_2) Y_0(B, r)]}{[J_0^2(B, R_1) - J_0^2(B, R_2)]^{\frac{1}{2}}} \quad (81)$$

$$\times D \int_0^t \exp(DB^2 t') [J_0(B, R_1) T_2(t') - J_0(B, R_2) T_1(t')] dt'$$

A qual, resolvendo-se a integral indicada e tomando o tempo $t \Rightarrow +\infty$, tem-se:

$$T(r, t) = \sum_B \frac{\pi B D (-1) J_0(B, R_1) [J_0(B, r) Y_0(B, R_2) - Y_0(B, r) J_0(B, R_2)]}{[J_0^2(B, R_1) - J_0^2(B, R_2)]^{\frac{1}{2}}} \quad (82)$$

$$\times [J_0(B, R_2) A_1 - J_0(B, R_1) A_2] \times \left[\frac{D \pi B \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{P+V}\right)}{(D^2 B^4 + 4^2 F^2)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

onde:

$$V = \arctan\left(\frac{2\pi F}{D B^2}\right) \quad (83)$$

A amplitude a um determinado raio r é dada por:

$$A = \sum_B \frac{J_0(B,r)Y_0(B,R_2) - J_0(B,R_2)Y_0(B,r)}{J_0^2(B,R_1) - J_0^2(B,R_2)} \times \frac{(D\pi B)}{(D^2 B^4 + 4^2 F^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (84)$$

Obtendo-se desta forma a difusividade real através da diferença de amplitudes pelo método do equilíbrio dinâmico em coordenadas cilíndricas

KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH (1981), determinaram a condutividade e difusividade térmica de grãos pelo método do equilíbrio Dinâmico em cilindros concêntricos. As propriedades térmicas dos grãos foram calculadas através das seguintes equações:

$$k = \frac{\frac{H^2 Q R_1}{R_2^2 - R_1^2} \left[\frac{R_1^2 - R_2^2}{2H^2} + \frac{R_2^2}{H^2} \ln \frac{R_2}{R_1} \right]}{T_1 - T_2} \quad (85)$$

$$D = \frac{R_1^2 - R_2^2 + 2R_2^2 \ln \frac{R_2}{R_1}}{4(T_2 - T_1)} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (86)$$

III. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão que se segue relata resultados de pesquisas sobre o comportamento térmico de materiais biológicos, e particularmente informações sobre os diferentes métodos de determinação dessas propriedades térmicas. Com o intuito de tornar mais clara a revisão de literatura, os trabalhos baseados na Teoria da Fonte Linear de Calor são apresentados separadamente e não junto com os métodos baseados no regime transiente de calor.

Alguns dos trabalhos citados no item Método de Equilíbrio Dinâmico são de experimentos realizados em solos, pois grande parte dos trabalhos desse método foram desenvolvidos para solos, podendo suas equações serem adaptadas para outros materiais.

3.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é um parâmetro físico importante para o estudo da 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, sendo que a sua determinação experimental é enfatizada por BHUMBLA e SINGH (1993).

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 é maior 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. VIEIRA e GASPARETTO (1995), determinaram a variação da condutividade térmica em função do conteúdo de umidade para alimentos, incluindo frutas. A temperatura também pode afetar o valor da condutividade. A densidade tem importância apenas para os alimentos muito menos densos que a água.

Segundo MUIR e VIRAVANICHAH (1972), 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 da temperatura entre (20 a 48°C).

RAHMAN, CHEN e PERERA, (1997), aperfeiçoaram um modelo de predição da condutividade térmica de frutas e vegetais em função do teor de umidade, porosidade e temperatura (equação 87) utilizando batata, maçã, pêra, uva-passa e amido de milho. O erro de predição no cálculo da condutividade térmica pelo modelo aperfeiçoado esteve dentro do intervalo de 6,8-15,1%, o que é segundo os autores aceitável para a prática da engenharia.

$$\frac{D}{1 - \varepsilon_i + \frac{k_i}{(k_w)_r}} = 0,996 \left(\frac{T}{T_r} \right)^{0,713} X_a^{0,285} \quad (87)$$

Segundo MOHSENIN (1980), a migração de umidade pode ser notada quando ocorre transferência de massa sempre que existe a diferença de temperatura em um meio permeável à umidade. Em muitos casos esse efeito se deve à evaporação na região aquecida, transmissão do vapor por difusão para uma região resfriada e condensação nessa região. Nessas mesmas condições, o calor, na forma de calor latente, é transmitido por este mecanismo sendo adicionado ao calor transferido por condução. O fenômeno de migração de umidade altera continuamente a condutividade térmica do material a ser testado.

Devido a 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 (MOHSENIN, 1980).

Para o trigo, segundo MOOTE (1953), a migração de umidade se processa por difusão do vapor d'água através dos espaços intergranulares e pelo intercâmbio de umidade entre o trigo e o ar ao redor dele.

Métodos empíricos de determinação da condutividade tem sido empregados gerando um grande número de dados para produtos alimentícios empregando-se de equações baseadas apenas na matéria seca e teor de umidade do material. Estas expressões apresentam sérios inconvenientes, como a variação na composição química, estrutura interna e outros fatores que podem afetar as propriedades térmicas dos produtos e que não são computados, gerando valores de condutividade errôneos (MOHSENIN, 1980).

FASINA e SOKHANSANJ (1996), determinaram as propriedades térmicas de pelets de alfafa e verificaram que a condutividade térmica desse material varia com a temperatura.

Unsklesbay citado por GOEDEKEN, SHAH e TONG (1998), relata que a condutividade térmica é função da porosidade, conteúdo de umidade e temperatura.

TAVMAN e TAVMAN (1998), obtiverem, baseados em dados experimentais, um modelo para a estimar a condutividade térmica efetiva do trigo que aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade. A regressão linear obtida foi:

$$k = 0,14299 + 0,001264 X_a \quad (88)$$

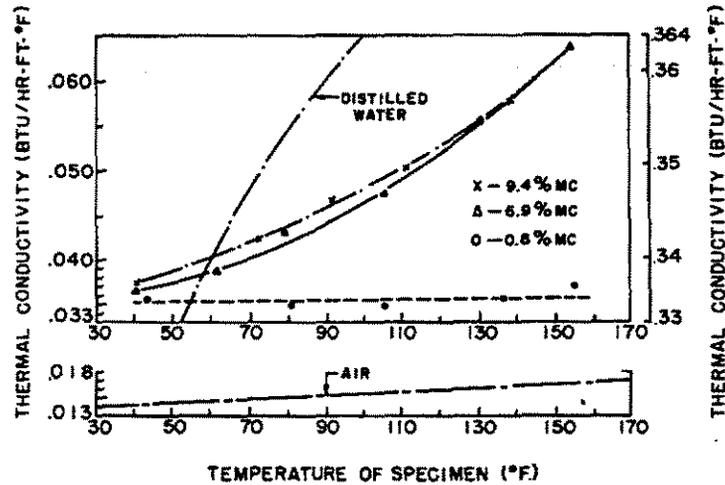
MANDHYAN e PRASAD, (1994), estudaram o efeito do tamanho da partícula e do conteúdo de umidade sobre as propriedades térmicas de grãos de soja. A condutividade térmica foi determinada para diversos teores de umidade, temperatura e tamanho da partícula. A equação empírica desenvolvida foi:

$$k = 0,08159 + 0,0195 + 0,000619 X_a + 0,0003 T + 4,66 * 10^{-8} T^2 - 0,00011 d X_a + \dots + 2,2 * 10^{-7} d t + 1,93810^{-8} X_a T \quad (89)$$

Estes autores observaram que a condutividade térmica aumenta com o aumento do tamanho da partícula, e que isto se deve ao fato que a densidade específica também aumenta com aumento do tamanho da partícula, reduzindo os espaços porosos. Foi observado que a condutividade térmica aumenta com o aumento do teor de umidade.

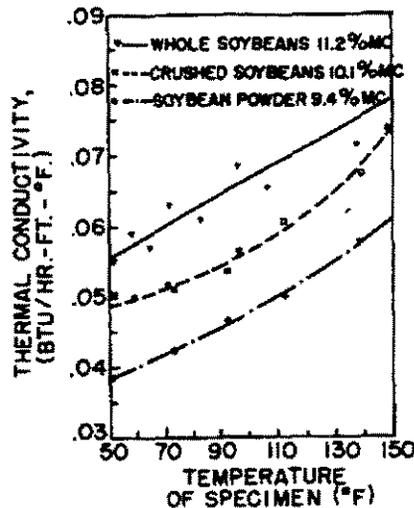
JASANSKY e BILANSKY (1973), determinaram o efeito da temperatura, do tamanho da partícula e do conteúdo de umidade sobre a difusividade térmica da soja. Os autores observaram que a condutividade térmica do material seco é pouco afetada pelas mudanças da temperatura e por outro lado o valor da condutividade aumenta com o aumento do conteúdo de umidade do

material e da temperatura, principalmente pelo aumento da condutividade da água com o aumento da temperatura como pode ser visto na figura (1). Nesta figura, a condutividade térmica do ar e da água aparecem com o intuito de se demonstrar o efeito da umidade sobre a condutividade térmica da soja. Os resultados da influência do conteúdo de umidade, diâmetro das partículas e temperatura sobre o valor da condutividade térmica da soja pode ser observado na figura (2).



Fonte: JASANSKY e BILANSKY (1973).

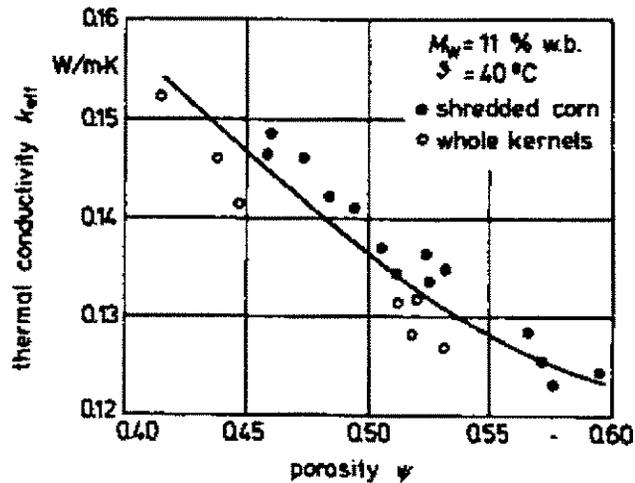
Figura 1: Variação da condutividade térmica de fubá de soja com a temperatura.



Fonte: JASANSKY e BILANSKY (1973).

Figura 2: Variação da condutividade térmica com a temperatura para a soja inteira, moída e fubá.

KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH (1981), determinaram os valores de difusividade e condutividade térmica para o milho e constataram que o valor da condutividade térmica varia de acordo com a porosidade do material. Quanto maior a porosidade, maior a quantidade de ar e menor o valor da condutividade térmica. A figura (3) apresenta os valores de k relacionados com a porosidade.



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

Figura 3: Valores da condutividade do milho em função a porosidade.

3.2. DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Reidel (1969), citado por CHOI e OKOS (1986), encontrou a seguinte expressão para a difusividade térmica, a qual abrange um grande número de produtos alimentícios, limitados para produtos com teor de umidade acima de 40%:

$$D = 0,088 \cdot 10^{-6} + (D_w - 0,088 \cdot 10^{-6}) X_a \quad (90)$$

Segundo MAGEE e BRANSBURG (1995), no projeto e otimização de processos térmicos, aonde o calor transferido ocorre em regime transiente, é importante conhecer a taxa com que o calor se difunde através do material. Portanto, a difusividade térmica (D), é uma propriedade importante e é afetada pela composição e homogeneidade do material. O mesmo autor utilizou um modelo de predição da difusividade térmica de batata, farinha de trigo e pão cevada.

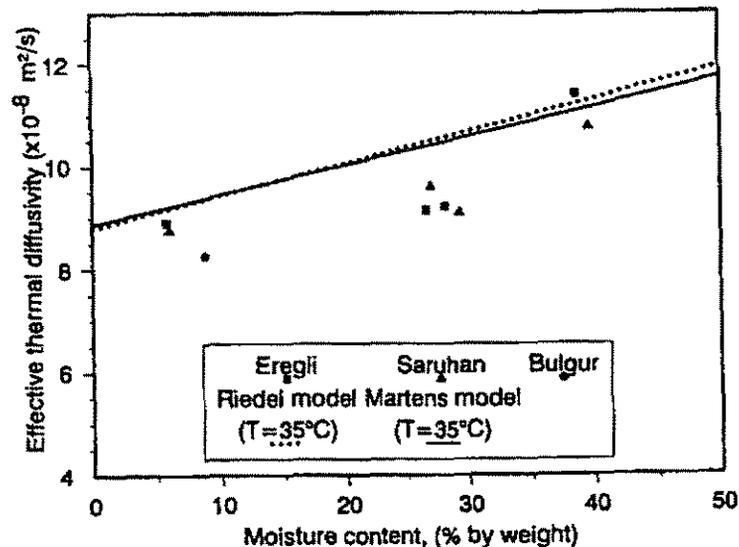
$$D = (0,0574X_a + 0,000288(T + 273)) * 10^{-6} \quad (91)$$

Martens (1980) citado por CHOI e OKOS (1986), determinou a difusividade térmica considerando os componentes básicos dos alimentos, como água (X_a), proteína (X_p), gordura (X_g) e carboidratos (X_c), a uma temperatura de 20°C obtendo-se a seguinte expressão:

$$D = (0,146X_a + 0,100X_g + 0,075X_p + 0,082X_c) * 10^{-6} \quad (92)$$

De acordo com Danielson, citado por TIE (1969), normalmente a difusividade térmica é obtida por métodos transientes, e determinando-se a difusividade térmica se obtém a condutividade térmica do material, utilizando seus valores de Cp e ρ .

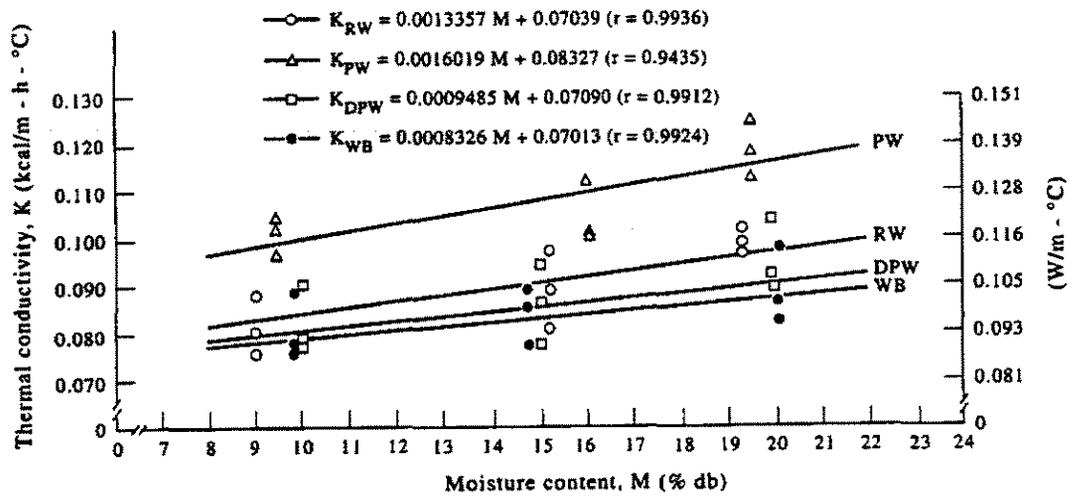
De acordo com TAVMAN e TAVMAN e EVCIN (1997), as propriedades de alguns alimentos (grãos, produtos porosos e pó) são mais difíceis de se determinar, devido a estrutura heterogênea desses materiais. O valor da difusividade térmica do material é afetada pela umidade, temperatura, porosidade e composição e esse valor determina com que velocidade o calor se propaga e como ele se difunde através do material. 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. Os valores encontrados pelos autores foram comparados com outros valores de literatura, como podem ser observados na figura (4).



Fonte: TAVMAN, TAVMAN e EVCIN (1997)

Figura 4: Comparação dos valores de difusividade térmica para duas variedades de trigo com dados de literatura em relação ao conteúdo de umidade.

SHYAMAL, CHAKRAVERTY e BANERJEE (1994), determinaram a difusividade e condutividade térmica do trigo, trigo cozido e sem fibra com diferentes teores de umidade e concluíram que a condutividade térmica aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade, como pode ser observado na figura (5).



Fonte: SHYAMAL, CHAKRAVERTY e BANERJEE (1994).

Figura 5: Condutividade térmica versus conteúdo de umidade para trigo, trigo cozido e sem fibra.

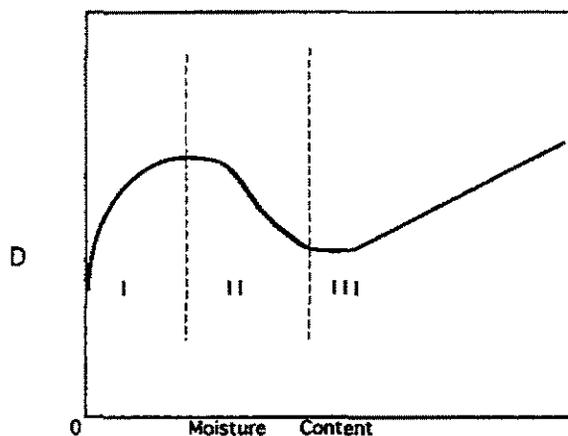
Segundo TAVMAN, TAVMAN e EVCIN (1997), alimentos particulados não contêm água livre e podem ser considerados como um sistema de duas fases, uma contendo água adsorvida e a outra contendo ar com vapor de água em equilíbrio com as partículas do material. Em tais sistemas a medição ou estimativa das propriedades térmicas são essenciais à condutividade térmica e difusividade térmica efetivas, que representam o total do calor conduzido através da fase gasosa e das partículas.

De acordo com KOSTAROPOULOS e SARAVACOS (1997), a difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte dos alimentos, sendo utilizada para a simulação e controle de diversas operações básicas de alimentos submetidos a processos de transferência de calor em regime transiente. Os dados experimentais dos mesmos autores, mostram que a difusividade térmica é fortemente afetada pela estrutura física dos materiais. Batata e café seco congelado apresentaram valores de D muito mais alto que a carne, devido a sua alta porosidade.

Segundo os mesmos autores, esse comportamento anormal é característica de materiais porosos e granulares. Materiais com estrutura heterogênea contêm grandes espaços onde o ar se dispersa. A difusividade térmica do ar é aproximadamente 150 vezes maior que a água em estado líquido (ex: $2,25 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (ar) versus $1,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (água) a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e pressão atmosférica). Portanto, em alimentos que tiverem alta porosidade é esperado que tenham uma maior difusividade térmica que os alimentos não porosos, com o mesmo conteúdo de umidade.

KOSTAROPOULOS e SARAVACOS (1997), descrevem mudanças não lineares da difusividade térmica e mássica em função da água em materiais porosos que podem ser explicadas por diferentes mecanismos de transporte. A figura (6) mostra um diagrama generalizado da difusividade térmica em função do teor de umidade de um material de inicialmente seco para úmido, podendo-se detectar três mecanismos de transporte:

- Região 1 (0-5% de umidade): os poros e capilares do sólido estão preenchidos de ar, o qual é gradualmente substituído por água absorvida. O calor é liberado pela adsorção de água no sólido aumentando a difusividade térmica.
- Região 2 (5-30%): a umidade é absorvida em camadas multimoleculares e os capilares são preenchidos gradualmente por água que substitui o ar. A difusividade térmica do material diminui pois a difusividade térmica da água líquida é menor do que a do ar.
- Região 3 (umidade >30%): a umidade está presente na forma de água capilar. A difusividade térmica aumenta linearmente com o aumento da umidade, devido ao aumento linear da condutividade térmica.



Fonte: KOSTAROPOULOS e SARAVACOS (1997).

Figura 6: Diagrama generalizado do comportamento da difusividade térmica em relação ao conteúdo de umidade.

WATTS e BILANSKI (1973), calcularam o valor da difusividade térmica de grãos de soja, obtendo uma média de $4,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ após 90 testes, não encontrando em seu trabalho nenhuma mudança significativa da difusividade térmica em relação às mudanças de temperatura e umidade. Os autores compreenderam entretanto, que deve existir um aumento da difusividade térmica com o aumento da umidade, pois já foi observado em outros trabalhos que a condutividade térmica da soja varia de acordo com a variação no teor de umidade, a densidade deve se manter constante e o calor específico (C_p) da soja aumenta com o aumento da umidade, portanto se observarmos a equação (2), é possível, segundo os autores que a taxa de incremento de C_p com o incremento da umidade resulte em uma pequena mudança na difusividade térmica, porém afirmam ser necessário maiores estudos sobre o valor da difusividade térmica da soja e sua dependência com o conteúdo de umidade, temperatura e tamanho da partícula.

3.3. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES TÉRMICAS - MÉTODOS EM REGIME PERMANENTE

A maioria dos valores relatados para condutividade térmica de grãos tem sido determinados 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

estacionário, gera uma técnica relativamente simples para determinação da condutividade térmica, (KAZARIAN e HALL, 1965).

Os métodos de 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 de estado estacionário em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas, respectivamente (FREIRE, 1981).

O método de placas paralelas foi utilizado por JIANG, JOFRIET e MITTAL (1986) para silagem de alfafa. O mesmo método (“guarded hot plate apparatus”) foi utilizado por WILLIX, LOVATT e AMOS (1998), para a determinação da condutividade térmica e sua relação com a temperatura abrangendo um intervalo de - 40 até 40°C, para 27 alimentos diferentes.

OXLEY (1994), utilizou o método das esferas concêntricas para determinação da condutividade térmica para grãos de trigo, milho e aveia.

No método de estado estacionário, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste. A razão constante de fluxo de calor, obtida 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, a condutividade média pode ser calculada. Devido a sua simplicidade, este foi um dos primeiros métodos a ser utilizados para materiais biológicos (FREIRE, 1981).

SAKYAMA e YANO (1994), estudaram a dependência da temperatura sobre a condutividade térmica efetiva de gel impregnado com bolhas de ar pelo método do regime permanente.

SCHMALCKO, MORAWICKI e RAMALLO (1997), determinaram a condutividade térmica e sua variação com o conteúdo de umidade de galhos de erva mate pelo método do regime permanente.

KAZARIAN e HALL (1965) e FREIRE,(1981), apresentam as desvantagens do método em regime permanente como de requerer muito tempo para realizar o experimento, podendo acarretar numa migração de umidade da amostra (umidade superior a 10%) e dificuldade para dimensionar a amostra que deve ter formas geométricas especiais, ocorrências de erros

experimentais com perdas de calor ao ambiente, etc.

JASANSKY e BILANSKI (1973), apontam como desvantagem do método do regime permanente o fato de que os instrumentos utilizados nos experimentos certamente não são portáteis e exigem considerável cuidado e experiência para manipula-los.

3.4. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES TÉRMICAS - MÉTODO DO REGIME TRANSIENTE

A condição fundamental para o estado transiente é que o valor pontual da variação da temperatura no tempo (dT/dt) seja diferente de zero.

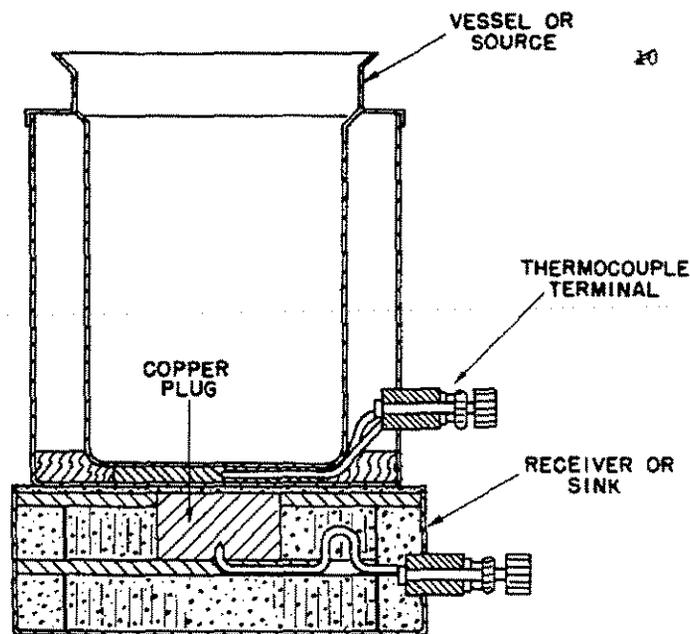
O método em regime transiente é muito utilizado em medidas de condutividade e difusividade térmica devido as suas vantagens tais como: rapidez na obtenção dos resultados e as condições de teste se aproximarem com as de processamento.

Quando os materiais agrícolas são perecíveis, o uso deste método é adotado devido a grande vantagem de requerer menor tempo de teste em comparação ao outro. No entanto, algumas dificuldades são associadas a este método, tais como, medir a temperatura, localização dos termopares, transferência de calor convectiva.

Entre os métodos de regime transiente destacam-se Método de Fitch, Método da Fonte Linear de Aquecimento (a qual será apresentado separadamente), Método proposto por Dickerson (1965), Método da Resposta Freqüente e o Método de Análise de Camada Conjunta (MOHSENIN, 1980).

O método de Fitch, é um dos métodos mais comuns de regime transientes utilizados na medição da condutividade térmica em condutores pobres. Este método foi desenvolvido por Fitch em 1935, sendo que o aparato consiste de duas partes, uma fonte ou vaso contendo o líquido a temperatura constante e um tanque contendo uma peça de cobre isolada.. A fonte é essencialmente um vaso pesado de cobre com isolamento dos lados e aterrado, contendo um termopar. O tanque consiste de uma peça de cobre com um termopar. Uma fina camada de material a ter sua condutividade térmica determinada é colocada entre o tanque e o vaso. A condutividade é medida pela obtenção da variação da temperatura com o tempo (ZURITZ et al. 1989, MOSEHNIN, 1980).

A figura (7) mostra um esquema do equipamento utilizado para o método de Fitch.

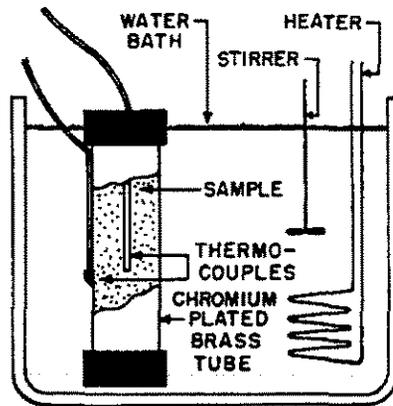


Fonte: MOHSENIN (1980).

Figura 7: Esquema do equipamento utilizado para o método de Fitch.

MAGEE (1995), determinou a difusividade térmica da batata, pão de cevada e da farinha de trigo, utilizando dois diferentes métodos em regime transiente baseados na solução da equação de Fourier.

MAGEE (1995) e TAVMAN e TAVMAN e EVCIN (1997) utilizaram um equipamento semelhante ao descrito por Dickerson (1965), que se baseia na transferência de calor em condições transientes, requerendo somente dados de temperatura e tempo. O equipamento consiste em um banho de água em agitação mantida a temperatura constante, no qual um cilindro com alta condutividade térmica contendo a amostra é emergido. Nesse cilindro há termopares soldados na superfície do cilindro monitorando a temperatura da amostra até o raio R . Uma fina sonda indica a temperatura no centro da amostra. O esquema do equipamento está mostrado na figura (8).



Fonte: MOHSENIN (1980).

Figura 8: Esquema do Equipamento para medidas diretas da difusividade térmica proposto por Dickerson (1965).

VINOD e BERA (1995), determinaram a condutividade e a difusividade térmica do feijão através da análise do método transiente de transferência de calor. Foram utilizadas quatro níveis de umidades e quatro níveis de temperatura. A metodologia utilizada consistia em colocar areia em um recipiente agitando-a com uma pá de aço inox. Dois termômetros foram usados separadamente para registrar a temperatura da areia e do produto. Quando a areia atingiu a temperatura desejada, o queimador de gás foi desligado e em seguida a amostra de feijão (50g), foi adicionada e vigorosamente agitada, misturando-a com a areia por curto espaço de tempo. Após a mistura dos dois componentes, a areia e a amostra foram despejadas numa peneira para a separação da areia. A amostra foi coletada rapidamente, sendo registrada a temperatura no centro da amostra.

A condutividade e difusividade térmica foram estimadas com base nos valores de temperatura, umidade e peso médio da amostra. Os autores observaram que a condutividade e difusividade térmica variam com a temperatura e teor de umidade, como mostra o quadro (2).

Quadro 2: Propriedades térmicas do Feijão em vários níveis de umidade e temperatura.

Conteúdo de Umidade Base seca (%)	Temperatura	Condutividade Térmica (W/m°C)	Difusividade Térmica (m ² /s)
15	76,00	0,23	1,00.10 ⁻⁷
25	71,56	0,28	1,07.10 ⁻⁷
30	69,42	0,30	1,10.10 ⁻⁷
35	66,66	0,33	1,14.10 ⁻⁷

Fonte: VINOD e BERA (1995).

KONG et. al. (1994), determinaram a difusividade térmica efetiva de peixes e carnes por um método transiente de condução de calor em uma dimensão, determinando a dependência do valor da difusividade térmica com o teor de umidade.

Outro método empregado para fluxo transiente de calor é o Método de Análise de Frequência e Resposta, o qual utiliza o conceito de uma teoria de transporte de ondas no processo dinâmico, considerando uma variação cíclica da temperatura entre a camada conjunta de sólidos. Quando a onda de temperatura passa pela camada de sólidos, o calor é trocado entre o fluxo de fluido e a fase sólida estacionária.

Durante a primeira metade do ciclo o calor é transferido do fluido para o sólido e durante a outra metade ele retorna para o fluido com a direção da transferência determinada pela diferença entre o fluido e a superfície sólida de cada ponto da camada. A troca de calor e a dispersão do fluido resultam na redução da amplitude e mudança no ângulo de fase da onda de temperatura quando essa passa através da camada. A magnitude dessa mudança de fase é dependente das condições do fluxo, geometria e mecanismos de transferência de calor na camada. Medindo-se a amplitude e mudança de fase e conhecendo os parâmetros de geometria e condições de fluxo, propriedades térmicas como condutividade térmica, podem ser calculadas. Uma das desvantagens deste método está na geração de uma onda senoidal pura de temperatura com grandes frequências e amplitudes suficientes para uma medição precisa dos dados, (MOHSENIN, 1980).

OTTEN (1974) utilizou o método de Análise de Freqüência de Resposta para o cálculo da condutividade térmica em materiais granulares. De acordo com o mesmo autor, todos os métodos clássicos se baseiam na suposição de que as amostras do material são homogêneas e isotrópicas, de forma que quando um ponto da amostra é aquecido, o fluxo de calor é igual em todas as regiões. Obviamente, nos casos em que a amostra consiste de um número de partículas granulares, a condução de calor é diferente para cada direção e portanto a amostra não é um sistema anisotrópico.

Para materiais granulares como sementes e grãos, geralmente de tamanho pequeno, a determinação da condutividade térmica se torna difícil para a medição em partículas individuais. Afim de sanar esse problema, utiliza-se um método indireto de transferência de calor em um leito empacotado de partículas MOHSENIN (1980).

WATTS e BILANSKI (1973), utilizaram um método transiente para se 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.

MAGEE (1995), cita em seu trabalho algumas limitações e fontes de erro dos métodos transientes (“log method” e método da sonda) entre elas: a existência de uma diferença de temperatura entre a parede interna e externa 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.

3.5. MÉTODO DA FONTE LINEAR DE AQUECIMENTO (LINE HEAT SOURCE METHOD)

O método da Fonte Linear de Aquecimento é um dos mais relatados para materiais granulares e consiste em aquecer a massa de grãos, inicialmente com 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).

As principais vantagens do método da sonda são: a mínima perturbação imposta ao aparelho medidor, a possibilidade se de realizar repetidas medidas e a simplicidade dos

instrumentos. Segundo o mesmo autor, o método da sonda baseia-se na solução da equação de Fourier de condução de calor para uma fonte linear de calor semi-infinita, homogênea e isotrópica. Na aplicação prática, um fluxo de calor constante é aplicado em uma sonda cilíndrica produzindo um aumento da temperatura da sonda. A condutividade térmica (k) é determinada em função do tempo de resposta da mudança de temperatura da amostra em que a sonda está inserida (BILSKIE, HORTON e BRISTOW, 1998).

De acordo com Sweat, citado por GOEDEKEN, SHAH E TONG (1998), as vantagens do método da sonda incluem a facilidade de utilização, curto tempo de medida, flexibilidade em relação ao tamanho e forma da amostra e utiliza temperaturas próximas das condições ambientais. Por exigir menor tempo de medição, o método da sonda em materiais porosos, reduz os erros experimentais ocasionados pela migração de umidade, quando comparado ao método do regime permanente.

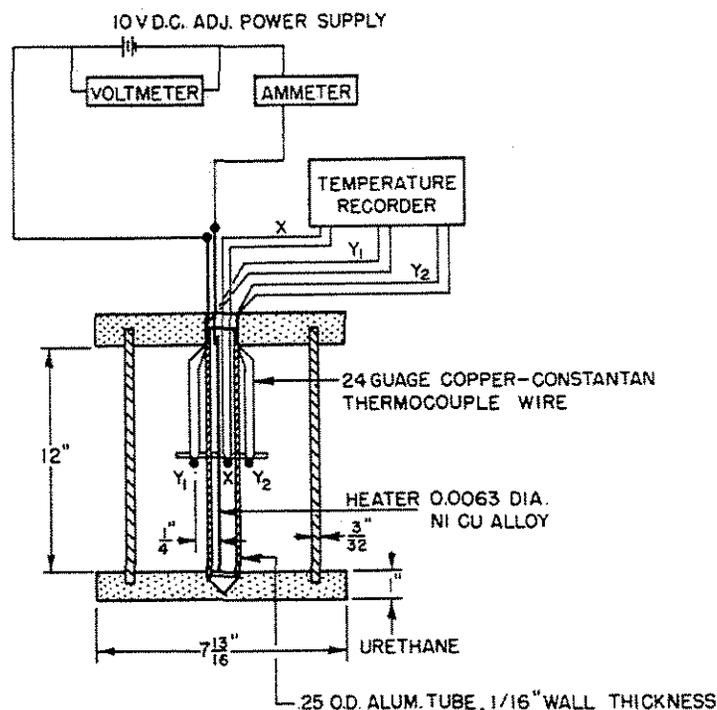
Segundo JASANSKY e BILANSKI (1973), os métodos transientes de fluxo de calor (fonte linear de calor) minimizam a migração de umidade, além de manterem a precisão dos métodos de regime permanente. Os mesmos autores relatam em seu trabalho que os resultados encontrados indicaram ser o método transiente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

O procedimento usual consiste em se aplicar um fluxo de calor constante da fonte para o material, inicialmente em equilíbrio, e medir a elevação de temperatura em algum ponto do material. As técnicas aplicadas sobre esses métodos são menos complicadas e mais simples que para métodos de estado estacionário. A precisão entretanto, não é tão grande para amostras secas, se comparada com os métodos de estado estacionário. Desde que muitos materiais agrícolas sujeitos a processos térmicos contêm certa quantidade de umidade e onde se faz presente o problema de migração de umidade, o método de estado transiente tem maiores vantagens que desvantagens para seu uso em materiais biológicos (MOHSENIN, 1980).

A teoria da fonte linear de calor se baseia na relação entre a condutividade térmica e a elevação da temperatura em um meio infinito homogêneo devido a fonte linear de aquecimento de

potência constante. A determinação das propriedades térmicas de partículas pequenas, como grãos, devido ao seu tamanho e forma irregular, é feita assumindo-se contornos regulares como os de um cubo, cilindro ou esfera. A razão para isto é facilitar a utilização das equações de transferência de calor derivadas destas formas especiais (SHARMA e THOMPSON, 1973).

KLUINTERBERG, BRISTOW e DAS (1995), descreveram em detalhes os erros associados com as mais recentes sugestões da dupla sonda (“dual-probe methods”), avaliando os erros originados pelo uso da teoria da fonte linear infinita para descrever um fluxo de calor de uma sonda com comprimento e diâmetro finito. Um esquema da sonda dupla é apresentado na figura (9).



Fonte: MOHSENIN (1980).

Figura 9: Esquema da sonda dupla para medição simultânea da condutividade e difusividade térmica.

De acordo com BILSKIE, HORTON e BRISTOW (1998), nesse método podem ocorrer erros gerados pelo contato da resistência entre a superfície da sonda e os poros da amostra e pela migração da umidade causada por um gradiente de temperatura relativamente grande. Segundo o mesmo autor, os problemas de contato da resistência e a migração de umidade podem ser minimizados nesse método se o material utilizado não possuir poros sem líquido, ou seja, utilizar-

se de materiais saturados.

Segundo MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996), o método da sonda é uma simplificação da aplicação da teoria da fonte linear de calor, mas esta simplificação acarreta em erros que podem ser minimizados particularmente pelo tamanho e material de construção da sonda. Quanto menor o diâmetro da sonda, maior a precisão do método, entretanto, sondas pequenas são difíceis de serem construídas, sendo recomendável que se use sondas que possibilitem obter erros aceitáveis para as aplicações desejadas.

Com o objetivo de melhorar a precisão do método da sonda, numerosas pesquisas relataram modificações no desenho básico proposto por SWEAT (1974). HAYAKAWA e SUCAR (1983), devido a resposta não-linear dos termopares, usaram sensores de temperatura miniaturas. Segundo MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996), devido a baixa condutividade térmica do ar, vários trabalhos preencheram os espaços vazios da sonda com fluídos para a diminuir o tempo de resposta.

MOHSENIN (1980), JASANSKY e BILANSKI (1973), NIX et al. (1967), citam que algumas hipóteses da teoria do método não podem ser atendidas no arranjo experimental, tais como o raio infinitesimal do fio de aquecimento, resistência térmica de contato nula, igualdade de propriedades térmicas entre a amostra e o fio de aquecimento, tamanho infinito da amostra, etc. Essas discrepâncias foram estudadas por diversos autores demonstrando que essas diferenças entre a teoria e os dados experimentais podem ser consideradas as geradoras de um erro constante no tempo observado, isto é, essas diferenças geram um calor anterior a medição do tempo do ensaio.

De acordo com Van der Held e Van Drunen, citados por MOHSENIN (1980), o fato de que toda fonte linear de calor ter um raio finito, os autores introduziram um fator de correção do tempo, que é subtraído de cada dado de tempo observado. Underwood e McTarggart também citados por MOHSENIN (1980), propuseram um outro método para se ajustar essa diferença. O método consiste em se graficar os dados de temperatura e tempo observados em um gráfico semi-log, ajustando-se ao longo dos pontos, uma reta de forma que um incremento de tempo seja observado a partir de cada ponto. Nesse caso o valor de t_0 não é determinado, uma vez que o mais importante é a inclinação da reta.

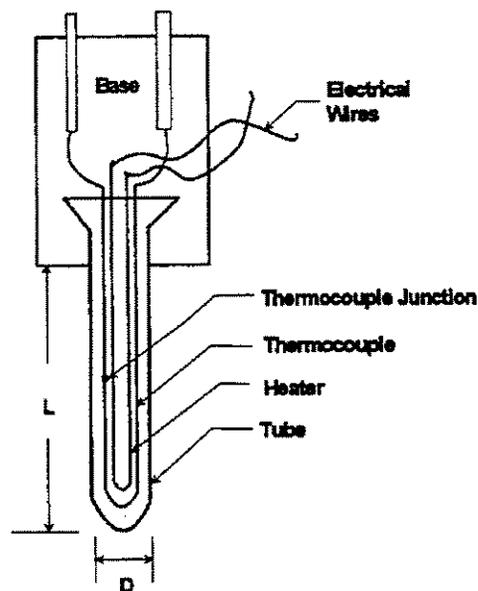
MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996), e MOHSENIN (1980), recomendam que para

corrigir o erro do fluxo axial na medida da condutividade pelo método da sonda que o tamanho do raio da sonda seja o menor possível para minimizar os erros, ou seja a relação comprimento/diâmetro da sonda (L/D) tem de ser a maior possível.

MOHSENIN (1980), relata que o tamanho finito da amostra no sentido radial pode resultar numa fonte de erro e para minimizar o erro, o tempo de medida tem de ser curto e o diâmetro da amostra tem de ser aumentado. Uma forma de se contornar esse problema é colocar um segundo termopar próximo a superfície externa da amostra. Quando a temperatura nessa superfície começar a aumentar deve-se parar o ensaio.

Segundo MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996), o uso de termopares como sensor de temperatura tem como desvantagem a menor precisão em relação a outros sensores, entretanto, a precisão dos mesmos pode ser melhorada através da calibração e seleção apropriada de um conversor que opere na faixa de temperatura desejada. É recomendável que o fio do termopar seja o menor possível para minimizar o tempo de resposta.

MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996), recomendam um projeto de construção de uma sonda dividida em quatro partes: a base, o tubo, fio de aquecimento e o termopar. Um esquema da sonda de medição da condutividade térmica é apresentado na figura (10).



Fonte: MURAKAMI, SWEAT e SASTRY (1996).

Figura 10: Esquema da sonda de medição da condutividade térmica

O fluxo transiente de calor em uma massa infinita, através de uma fonte linear de aquecimento, foi adotado por BABBIT (1945) na determinação da condutividade térmica de trigo; CHANDRA e MUIR (1971) em trigo; KAZARIAN e HALL (1965) para trigo e milho; WRATTEN et al. (1989) para arroz em casca; SHARMA e THOMPSON (1973) em sorgo; TIMBERS (1975) para sementes de colza, CHANG (1986) para trigo, milho e sorgo; DUTTA, NEMA e BHARDWAJ (1988) para sementes de grama, KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH (1981) para milho e PARK, MURR e SALVADEGO (1997b) para milho triturado.

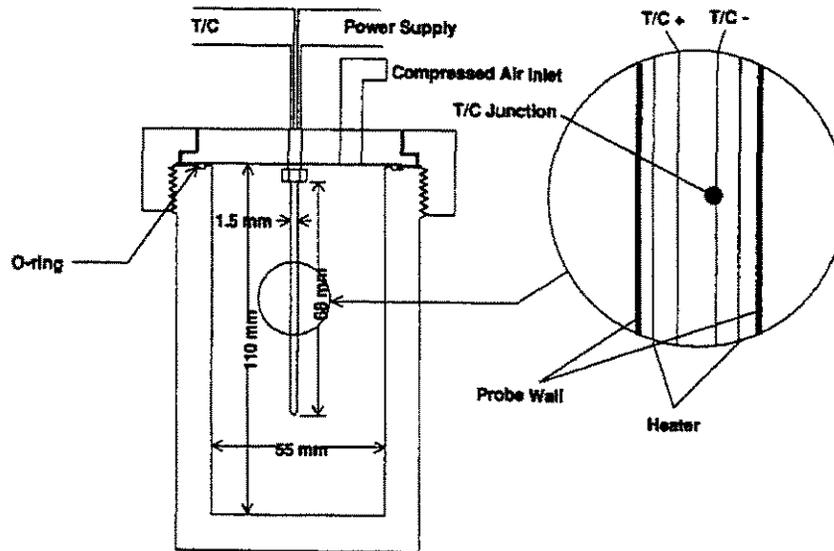
De acordo com BILSKIE, HORTON e BRISTOW (1998), Larson, utilizou a fonte linear de calor e observou a resposta da temperatura usando 10 sensores de temperatura localizados em volta da fonte de calor para determinar a difusividade térmica. Campbell, citado por BILSKIE, HORTON e BRISTOW (1998), obteve bons resultados para o cálculo da capacidade térmica volumétrica (ρC_p), com medidas de resposta de temperatura em distâncias conhecidas da fonte linear de calor. E baseado na teoria da fonte linear de calor pulsante (pulsed line heat-source theory), obteve determinações simultâneas da difusividade térmica e da capacidade térmica volumétrica (ρC_p).

BILSKIE, HORTON e BRISTOW (1998), determinaram as propriedades térmicas de materiais porosos, como de uma suspensão coloidal de α -alumina, solução de glicerol e solo saturado; pelo método da sonda dupla, obtendo bons resultados e concluindo que o método é uma boa ferramenta para a determinação das propriedades térmicas de materiais porosos.

Outros pesquisadores que utilizaram a técnica do fio quente em alimentos são: QUASHOU et. al. (1970) que trabalharam com carne moída; RAO, BARNARD e KENNY (1975) que determinaram a condutividade e difusividade térmica de batata e abóbora enfatizando que além da umidade, a densidade do produto também afeta o valor da condutividade; SHARMA e THOMPSON (1973) determinaram a condutividade térmica de grãos de sorgo para diferentes níveis de umidade e apresentaram um modelo de cálculo em função do conteúdo de umidade.

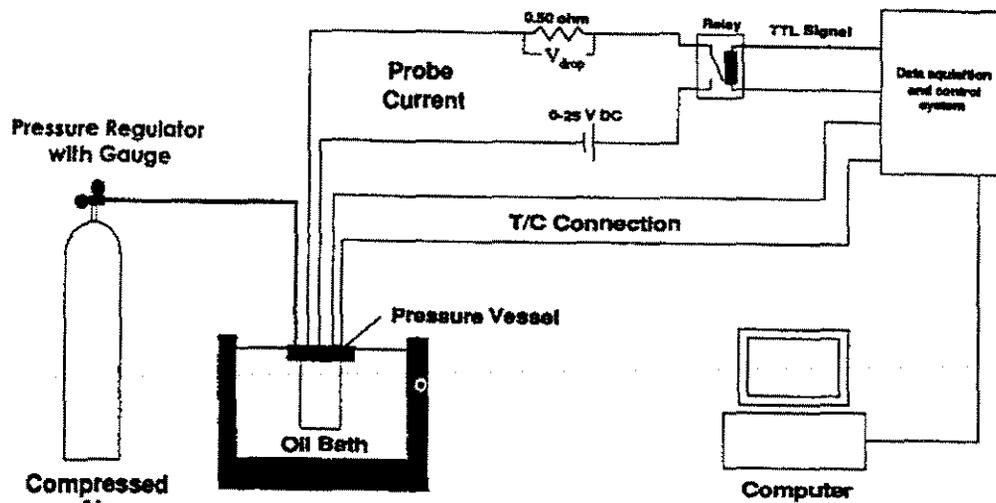
TAVMAN e TAVMAN (1998) determinaram a condutividade térmica efetiva de duas variedades de trigo em diferentes umidades (9,17-38,65% em base úmida) pelo método da fonte linear de calor.

GOEDEKEN, SHAH e TONG (1998), determinaram a condutividade térmica real de materiais com diferentes porosidades (pão) e diferentes teores de umidade (5 a 44%), através do método da sonda com algumas modificações, utilizando um equipamento que suprimiu a migração de umidade através da aplicação da ar sob pressão. O equipamento utilizado consiste de uma sonda inserida em um vaso de pressão projetado para suportar altas temperaturas e pressões, e seu interior foi colocada a amostra. O vaso foi submerso em um banho de óleo com temperatura constante para o controle da temperatura, como pode ser observado na figura (11) e (12). A transferência de calor provocada pela migração da umidade pode ser completamente eliminada quando é aplicado uma pressão de gás suficientemente alta na amostra porosa úmida durante a determinação da condutividade térmica. Conseqüentemente, a condutividade térmica efetiva pode ser medida.



Fonte: GOEDEKEN, SHAH E TONG (1998).

Figura 11: Esquema do vaso de pressão da amostra e da sonda para medir a condutividade térmica.



Fonte: GOEDEKEN, SHAH E TONG (1998).

Figura 12: Equipamento para medir a condutividade térmica.

NIX et al. (1967) demonstraram que o equipamento para medir a condutividade térmica pode ser usado para a determinação direta da difusividade térmica se um sensor adicional for colocada na amostra a uma distância conhecida r , tal que $0,16 < \beta < 3,1$. Os 40 primeiros termos da equação precisam ser calculados para assegurar a convergência. SUTER, AGRAVAL e CLARY (1972) puderam minimizar o tempo de cálculo se $0,2 < \beta < 0,5$. Nesse mesmo trabalho os autores citam as vantagens da técnica, tais como a simplicidade do equipamento, curto tempo de teste, pequeno tamanho da amostra, podendo ser aplicados em materiais sensíveis a aplicação de temperatura.

Backwell, citado por TAVMAN e TAVMAN (1998) demonstrou teoricamente que a sonda com comprimento 30 vezes maior que o diâmetro pode ter seus erros desprezados com respeito a suas dimensões finitas.

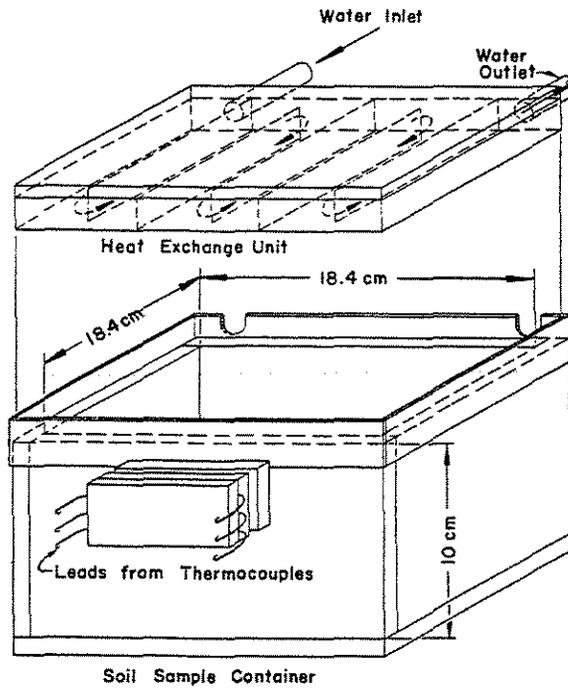
PARK, MURR e SALVADEGO (1997a), apresentam a construção do sistema do método da Fonte Linear de Aquecimento. O procedimento deste método consiste em se aplicar um fluxo de calor constante da fonte para o material, inicialmente em equilíbrio, e medir a elevação de temperatura em algum ponto do material.

PARK, MURR e SALVADEGO (1997b), mediram a condutividade térmica de milho triturado, pelo método da sonda, relacionando o aumento da condutividade do produto com o aumento da compactação e umidade. Em amostras com maior granulometria esse método apresentou problemas pois não se conseguiu uma compactação uniforme permitindo a presença desuniforme do ar entre os grãos.

3.6. MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO

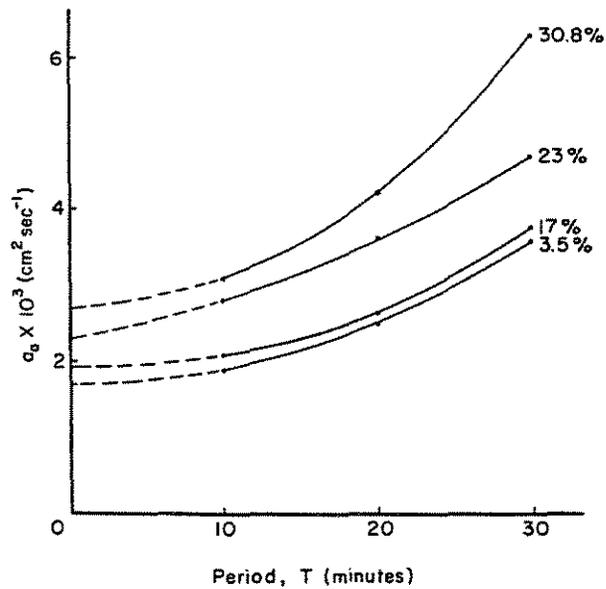
JACKSON e KIRKHAN (1958) citam em seu trabalho que migração de umidade em solos tem sido assumida como desprezível em determinações laboratoriais de coeficientes de condutividade térmica e difusividade térmica nos mais variáveis métodos. Portanto as medidas convencionais das constantes térmicas em solos 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) pesquisou a influência da umidade na determinação da difusividade de solos úmidos, utilizando o método do equilíbrio dinâmico (quasy steady state). O método em questão permitia que a migração da umidade se mantivesse em valor mínimo. Nesse trabalho a difusividade aparente foi composta por dois termos, a pseudo difusividade que representa o calor transferido em solos úmidos pela movimentação da umidade e a difusividade real, representada pelo calor transferido em um sólido. No experimento foi promovida a alternância da fonte de calor utilizada para que a transferência de umidade ocorresse em direções alternadas, reduzindo assim, os efeitos da movimentação da umidade na determinação da difusividade térmica dos solos analisados. Nesse método, um gráfico da difusividade térmica aparente *versus* período da onda de calor, resulta numa curva que, extrapolada para o período zero, forneceu o valor da difusividade real, correspondente ao valor zero do período. O esquema do equipamento utilizado por JACKSON (1957) é apresentado na figura (13). O gráfico em que o valor da difusividade térmica é extrapolada para o período zero é apresentado na figura (14).



Fonte: JACKSON (1957).

Figura 13: Esquema do equipamento utilizado por JACKSON (1957).



Fonte: JACKSON (1957).

Figura 14: Gráfico em que o valor da difusividade térmica é extrapolada para o período zero.

De Vries (1950), mencionado por JACKSON (1957) e TERESO (1983), 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.

Smith (1939), citado por JACKSON (1957) e TERESO (1983), estudou o comportamento térmico do solo, testando amostras com diversas umidades em recipientes cúbicos. Concluiu que há uma grande movimentação da fase de vapor e que, com tal método, no equilíbrio, não apenas se verifica um gradiente térmico, como também um gradiente de umidade. Os valores de condutividade térmica, para vários tipos de solos a diferentes umidades, foram determinados.

RABIN e SHITZER (1995), utilizaram a solução do método do equilíbrio dinâmico para o cálculo das propriedades térmicas de um tecido biológico submetido a baixas taxas de congelamento, semelhante as condições ocorridas em tratamentos “cryosurgical”. DONG et. al. (1996), desenvolveram um modelo físico para prever o comportamento e a geometria da migração de bolhas no ciclohexano (C_6H_{12}) submetido a um gradiente de temperatura. Para tal, o método das integrais de contorno (boundary element method) foi aplicado num processo de migração de bolhas no estado de equilíbrio dinâmico, governado pela equação de Laplace.

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.

WINIARSKI e ONEAL (1996), desenvolveram um modelo de equilíbrio dinâmico para prever a transferência de calor do sótão de residências com sistema de barreiras radiantes que reduzem a entrada do frio. O modelo foi usado para estimar a redução da carga de frio que poderia ocorrer com a barreira radiante, identificando parâmetros construtivos e ambientais que influenciem na redução da transferência de calor.

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.

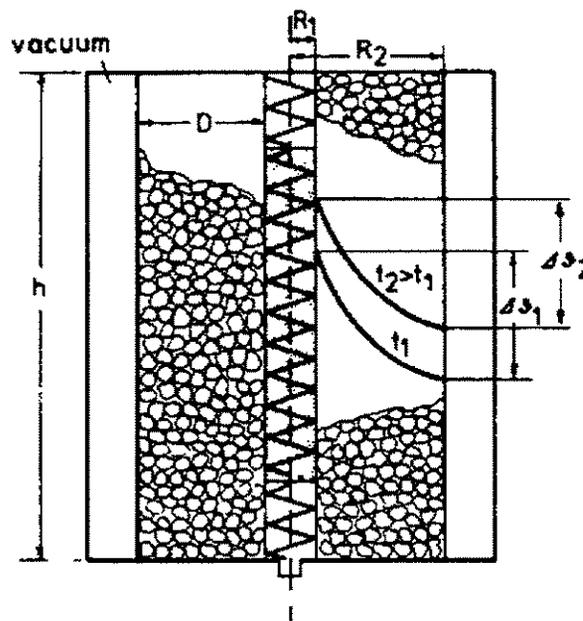
TERESO (1983) na solução analítica de seu trabalho de investigação do perfil da variação periódica da temperatura de solos agrícolas, obteve equações para o cálculo da difusividade térmica, tendo condições harmônicas de contorno semelhantes as de JACKSON (1957). Ambos autores utilizaram o mesmo modelo analítico apresentado na teoria do método em coordenadas cartesianas em questão.

DAL FABBRO e NUNES (1999), verificaram os resultados da distribuição radial da amplitude em amostras de solos de paredes cilíndricas concêntricas, através de métodos analíticos e por elementos finitos com o intuito de medir a difusividade térmica do solo em condições de equilíbrio dinâmico. A equação geral da condução de calor, expressa 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. 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. A solução analítica gerou uma variação de amplitude com o raio. Tais resultados foram comparados com dados encontrados em literatura.

De acordo com DAL FABBRO e NUNES (1999), para se utilizar o método do equilíbrio dinâmico (“quasi-steady state”), onde se utiliza a equação geral de difusão de calor expressa em coordenadas cilíndricas apresentada por ÖZISIK (1968) faz-se necessário desenvolver e utilizar um aparelho capaz de direcionar a distribuição radial da temperatura de uma amostra de grãos.

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

Os mesmos autores 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 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 figura (15).



Fonte: KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981)

Figura 15: Esquema do equipamento para o método do equilíbrio dinâmico.

KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH, (1981), 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 X_a (% em base úmida) obtendo:

$$K = u + n X_a + o T \quad (93)$$

Os coeficientes u , n e o da equação foram determinados experimentalmente para milho, trigo, cevada, aveia, centeio e uva passa.

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, concluindo que o método apresenta boa precisão. A comparação dos resultados encontra-se no quadro (3).

Quadro 3: Comparação da condutividade térmica do milho para diferentes métodos

Autor	UBS (%)	Método	Equipamento	k (W/m°C)
Oxley (1944)	13,2	Permanent e	2 esferas concêntricas	0,1765
Egorov (1960)	9,1-20,0	Transiente	equipamento de placas	0,43-0,53
Kasarian 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).

Como pode-se observar, todos os métodos apresentados na revisão bibliográfica possuem vantagens e desvantagens quando comparados entre si. O objetivo desta revisão foi mostrar as particularidades de cada método utilizado e o motivo pelo qual optou-se por desenvolver um equipamento que possibilitasse o uso de uma solução pelo método do equilíbrio dinâmico, que possui vantagens pela minimização da migração da umidade quando comparado aos outros métodos.

IV. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. MATERIAL

4.1.1. MATÉRIA-PRIMA

O experimento foi realizado na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

A matéria prima utilizada foi semente de soja (*Glycine max*) da variedade Ocepar 13, adquirida na Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI).

As sementes de soja foram divididas em três lotes, sendo que cada lote foi submetido a um processo de umidificação até os teores de umidade final desejados, a saber:

=>lote 1, teor de umidade do grão úmido (17- 20%, base úmida),

=>lote 2, teor de umidade do grão intermediário (13-16%, base úmida),

=>lote 3, teor de umidade do grão durante a armazenagem (9-12%, base úmida).

4.1.1.1. Umidificação

No processo de umidificação dos materiais, foi determinado primeiramente a umidades dos materiais pelo método descrito pela ASAE STANDARS (1990), que consiste em submeter amostras de aproximadamente 5g dos materiais a uma temperatura de 103 °C por 72 horas em uma estufa de ar forçado.

De posse do teor de umidade inicial de cada material, foi calculado o volume de água destilada que necessitava ser aplicado para se obter o conteúdo de umidade desejado.

No procedimento de umidificação, espalhou-se uma quantidade de peso conhecido do material sobre uma bandeja e com a utilização de um pulverizador manual foi aplicado a quantidade de água previamente calculado para se obter o teor de umidade desejado.

Após a umidificação, os materiais foram acondicionados em sacos plásticos para evitar a perda de umidade e guardadas em uma câmara refrigerada para que a distribuição uniforme da

umidade fosse alcançada sem se deteriorar. Para melhorar a distribuição uniforme da umidade, as bandejas com os materiais foram misturadas diariamente até que a umidade fosse alcançada. A operação de umidificação durou 21 dias.

Com o intuito de verificar a influência da granulometria e da porosidade no valor das propriedades térmicas, os grãos de soja foram triturados, obtendo-se três granulometrias diferentes.

- lote A, grão inteiro,
- lote B, grão moído,
- lote C, grão finamente moído (fubá).

Os experimentos foram conduzidos com os grãos triturados e com os grãos inteiros na, para os três níveis de umidade definidos acima.

Os grãos forma triturados no Projeto Piloto de processamento de Frutas da Faculdade de Engenharia de Alimentos da universidade Estadual de Campinas, se utilizou um moinho de martelo da marca Tigre com uma potência de $\frac{3}{4}$ de CV.

Cada material foi dividido em amostras que foram utilizadas no experimento para a coleta dos dados experimentais. O quadro (4) e a figura (16) mostram a distribuição e o aspecto dos diferentes materiais.

Quadro 4: Distribuição os materiais de acordo com o teor de umidade e granulometria

	Soja Inteira (A)	Soja Moída (B)	Soja Fubá (C)
Umidade 9-13% Seca (1)	Soja Inteira Seca (1A)	Soja Moída Seca (1B)	Soja Fubá Seca (1C)
Umidade 13-16% intermediária (2)	Soja Inteira Intermediária (2A)	Soja Moída Intermediária (2B)	Soja Moída Intermediária (2C)
Umidade 17-20% úmida (3)	Soja Inteira Úmida (3A)	Soja Moída Úmida (3B)	Soja Fubá Úmida (3C)

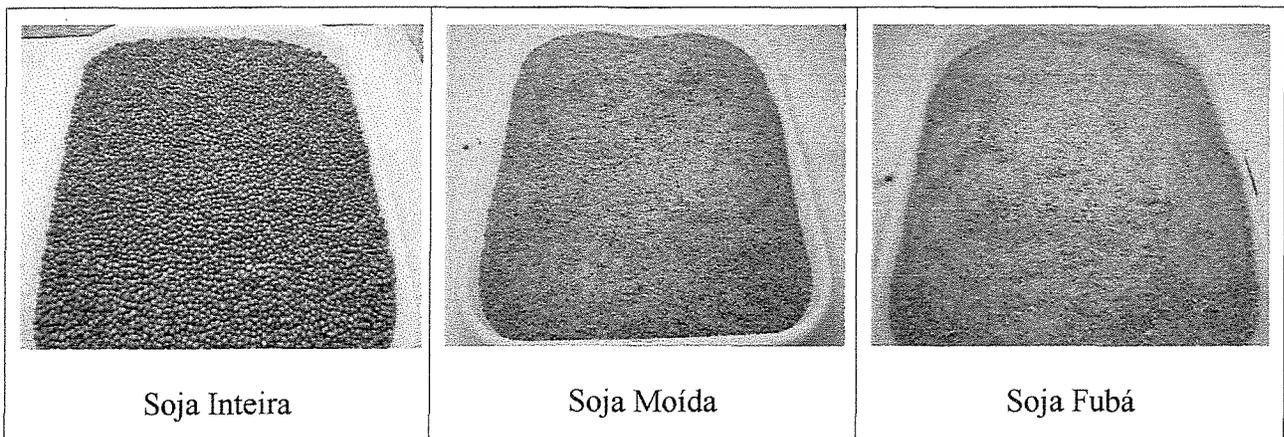


Figura 16: Aspecto das diferentes granulometrias do materiais testados

Cada material teve suas propriedades físicas determinadas, tais como: diâmetro médio das partículas, densidade real, densidade aparente e porosidade com o intuito de se caracterizar fisicamente o material.

Para cada material foi calculado o valor da difusividade e condutividade térmica por três métodos diferentes: método transiente da sonda, método do equilíbrio dinâmico e método do regime permanente.

4.1.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL

A determinação da densidade real foi feita utilizando-se água destilada como fluido picnométrico.

Primeiramente tomou-se três provetas graduadas de 250ml. Feito isso, colocou-se em cada proveta 150 ml de água destilada. Em seguida, pesou-se três amostras de aproximadamente 75g dos materiais que foram testados utilizando-se uma balança semi analítica, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01g, colocando-as posteriormente nas provetas, anotou-se o volume final da proveta com a água mais o material.

Foram realizadas três repetições para cada material.

A densidade real é então obtida por:

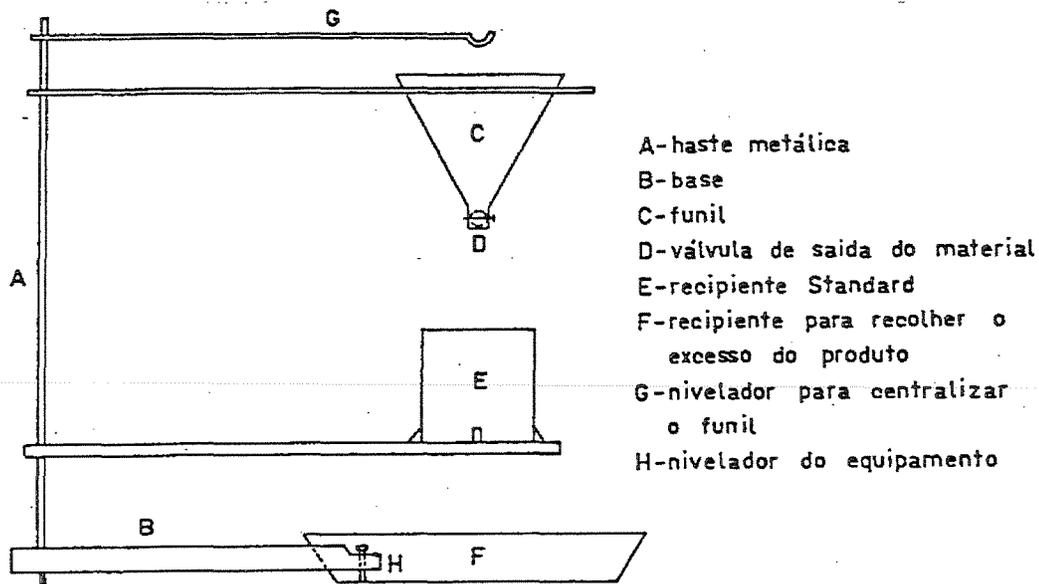
$$\rho_{\text{real}} = \frac{M_{\text{amostra}}}{V_{\text{final}} - 150} \quad (94)$$

4.1.3. 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 (17), primeiramente pesou-se o recipiente padrão vazio de volume previamente conhecido, 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, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01g, calculando-se a densidade aparente pela seguinte equação:

$$\rho_{\text{ap.}} = \frac{M}{\text{Vol. recip.}} \quad (95)$$

Foram realizadas três repetições para cada material.



Fonte: BENEDETTI (1987)

Figura 17: Equipamento utilizado para a determinação da densidade aparente.

4.1.4. POROSIDADE

A porosidade dos materiais foi determinada pela seguinte equação, que envolve os valores de densidade real e aparente determinados experimentalmente:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{real}} - \rho_{\text{ap.}}}{\rho_{\text{real}}} \quad (96)$$

4.1.5. DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO

O diâmetro médio de cada material de soja foi determinado, através do peneiramento do material com peneiras de diâmetro conhecido. Determinou-se a fração mássica retida em cada peneira e calculou-se o diâmetro médio de cada material.

Para os materiais de soja triturados (moído e fubá), foram feitas três repetições, submetendo amostras a um peneiramento no aparelho PRODUTEST por 10 minutos em um nível 7 de vibração, utilizando-se as peneiras de mesh 8 (2,38mm), 10 (1,68mm), 14 (1,19mm), 28 (0,59) e 48 (0,297mm), 100 (0,15mm) e 200 (0,075mm) e uma balança semi analítica, marca

Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01g. O aspecto do aparelho PRODUTEST é apresentado na figura (18).



Figura 18: Aspecto do equipamento para determinação do diâmetro médio da soja

Para os materiais de grãos de soja inteiros foram feitas três repetições, submetendo amostras a um peneiramento num equipamento de classificação comercial de peneiras vibratórias por 5 minutos, utilizando-se as peneiras 11 (7,541mm), 12 (7,144mm), 13 (6,747mm), 14 (6,356mm), 15 (5,953mm), 16 (5,556mm), 17 (5,159mm), 18 (4,760mm), 19 (4,366mm) e uma balança semi analítica, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01g.

O diâmetro médio dos materiais foi determinado de acordo com o descrito por KUNII e LEVENSPIEL (1969), sendo o seu valor calculado pela expressão:

$$dp = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (97)$$

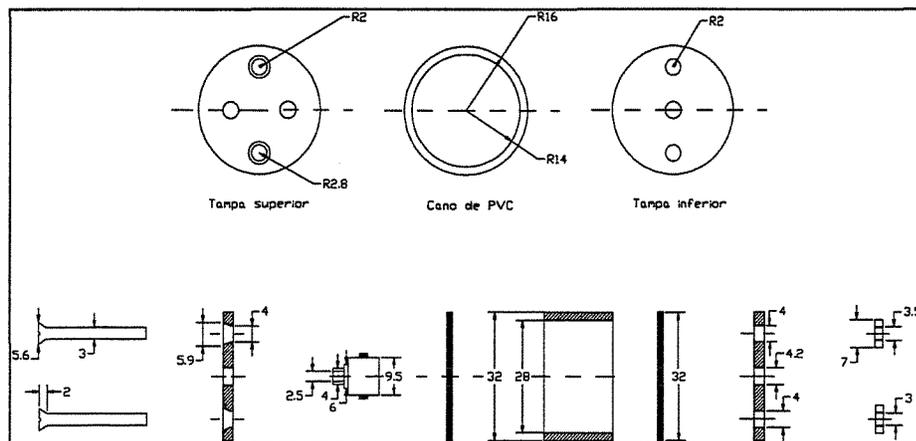
4.1.6. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS

4.1.6.1. Método da Sonda

O presente sistema de medição da condutividade térmica é composto por uma sonda, fonte de alimentação regulada digital de 30V/2A, com indicador de tensão e corrente, um PC 486-DX2, amplificador, placa conversora analógico/digital e fios, conforme mostrado na figura (22).

A sonda é constituída de uma base, uma agulha hipodérmica, conectores, parafusos e porcas, fio de níquel-cromo e termopar, os seus componentes podem ser visualizados na figura (19).

Os responsáveis pelo aquecimento são os fios de níquel-cromo, que são isolados com uma camada de cola "araldite". Seu comprimento compreende a extensão desde o conector até a extremidade da agulha, onde então é dobrado e retorna até a outra ponta de ligação do conector.



Fonte: PARK, MURR e SALVADEGO, 1997.

Figura 19: Detalhamento da base (cotas em mm)

A sonda foi introduzida no material e as medições foram efetuadas com a utilização de uma placa conversora analógico/digital, ligada a um microcomputador PC.

Ligou-se os fios de níquel-cromo à fonte de alimentação digital de 30V/2A, e efetuou-se a leitura de temperatura através de transdutores de temperatura, com termopares ligados a um amplificador de sinais e à placa conversora.

Utilizando-se um software compatível com a placa, efetuou-se medições automaticamente, ajustando-se a frequência de medição e o tempo.

Neste método, por se utilizar de um material desagregado (soja), foi necessário acondicionar as amostras dos materiais em algum frasco para que se obter um corpo de prova. Para tanto, utilizou-se uma proveta graduada de 50ml, onde as amostras foram acondicionadas no momento da determinação experimental, tomando uma forma cilíndrica.

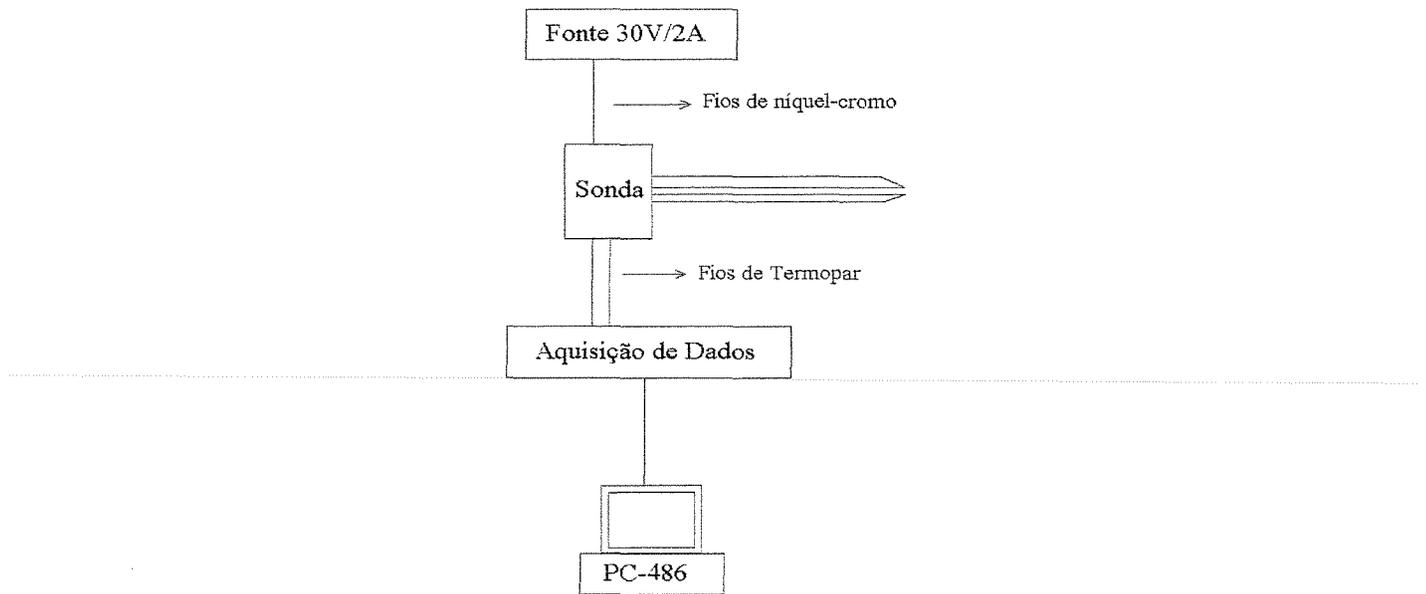
Utilizando o procedimento de determinação da condutividade térmica mostrado a seguir, foi obtido os valores referentes ao material testado.

Primeiramente as amostras foram acondicionadas na proveta, inseriu-se então a sonda, aguardando-se alguns instantes para que a temperatura da sonda e da amostra entrassem em equilíbrio. Conseguida tal condição, iniciou-se o experimento para determinação da condutividade, como pode ser observado na figura (21) que mostra o aspecto do equipamento utilizado.

Foram selecionados valores da corrente e a tensão da fonte de alimentação que fornecem a potência da fonte de calor para o fio de aquecimento da sonda, posteriormente foram registrados os dados de variação da temperatura em relação ao tempo através do termopar localizado no interior da sonda. Os dados obtidos foram graficados e linearizados utilizando uma escala monolog, calculando-se a condutividade térmica pela equação (31) apresentada na teoria básica.

A sonda utilizada, foi calibrada por OTTA (1998), utilizando-se de materiais dos quais suas propriedades termo-físicas são conhecidas, tais como ágar a 2%, etilenoglicol e glicerina, os erros relativos foram calculados comparando os valores experimentais com os valores da literatura. Segundo o autor, a sonda, para a condutividade térmica, apresentou erros relativos com bons valores, obtendo para a glicerina valores de erro relativo de 0,09 a 0,21 % e, desta forma, obteve-se gráficos com boa linearidade, apresentando-se em geral, uma boa sensibilidade nos testes.

O valor da difusividade térmica foi calculado através da equação (2), utilizando-se os valores de k calculados pelo método da sonda, dos valores da densidade real calculados e pelo valor de C_p encontrado em literatura. A figura (20) e (21) apresentam um esquema e o aspecto do equipamento utilizado no método da sonda.



Fonte: PARK, MURR e SALVADEGO (1997).

Figura 20: Esquema do sistema de medição da condutividade térmica pelo método da Sonda.

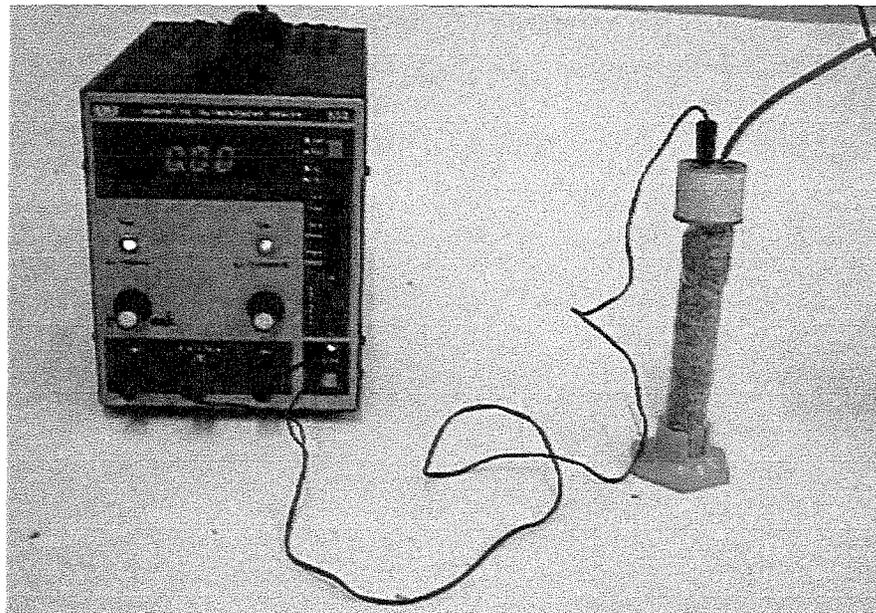


Figura 21: Aspecto da sonda e da fonte de alimentação elétrica utilizado no método da sonda.

4.1.6.2. Método do Regime Permanente

Na preparação do experimento neste método, o cilindro (figura 22) foi preenchido com o material até que a amostra de grãos estivesse a 2 cm da borda superior de modo a permitir a acomodação da tampa na extremidade superior. Para a realização dessa operação foi utilizado um funil ligado a um cano de PVC de 1,5 polegadas que tem como finalidade a diminuição do impacto entre os grãos e as pontas dos termopares para que estes não fossem danificados nem retirados da posição.

A chave reguladora de tensão foi ajustada para a posição desejada (5% ou 10%), ou seja a resistência elétrica recebia uma tensão de 5,5 ou 11V respectivamente (com a rede a 110V).

As extremidades dos termopares foram conectadas à unidade registradora de dados previamente programada para realizar as leituras dos 6 termopares em graus Celsius a um intervalo de tempo desejado, sendo a primeira leitura realizada antes de se ligar a chave reguladora de tensão obtendo-se a temperatura inicial dos termopares. O quadro (5) mostra a posição dos termopares em relação ao centro do cilindro do equipamento.

Alguns teores de umidade para o mesmo material testado diferem do método do regime permanente em relação aos outros métodos pois nesses casos os experimentos não foram feitos concomitantemente.

Quadro 5: Posição dos termopares em relação ao centro do cilindro.

n° do termopar	1	2	3	4	5	6
Posição (cm)	1	3	5	7	9	11

A unidade registradora de dados foi conectada a um microcomputador 486 DX2 que armazenou os dados das leituras das temperaturas obtidas pelos 6 termopares ao longo dos experimentos.

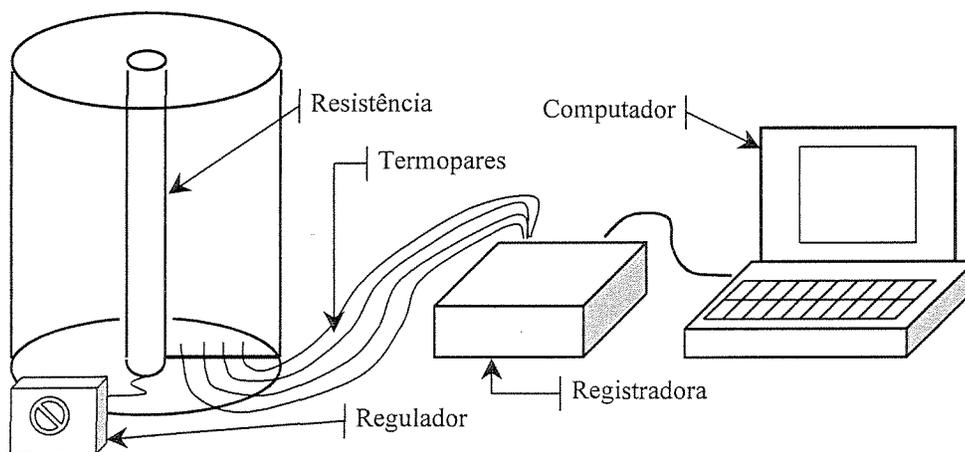
A corrente elétrica foi medida por um amperímetro. De posse dos dados experimentais coletados pela unidade registradora de dados e armazenado no microcomputador foi realizado o cálculo da condutividade e difusividade térmica das amostras pela seguinte equação:

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L(T_1 - T_2)} \quad (98)$$

Podemos considerar que o valor da potência dissipada pela resistência 'P_r' é o fluxo de calor 'Q', considerando que o calor flui homogeneamente pelo cilindro na direção radial, portanto P_r = Q.

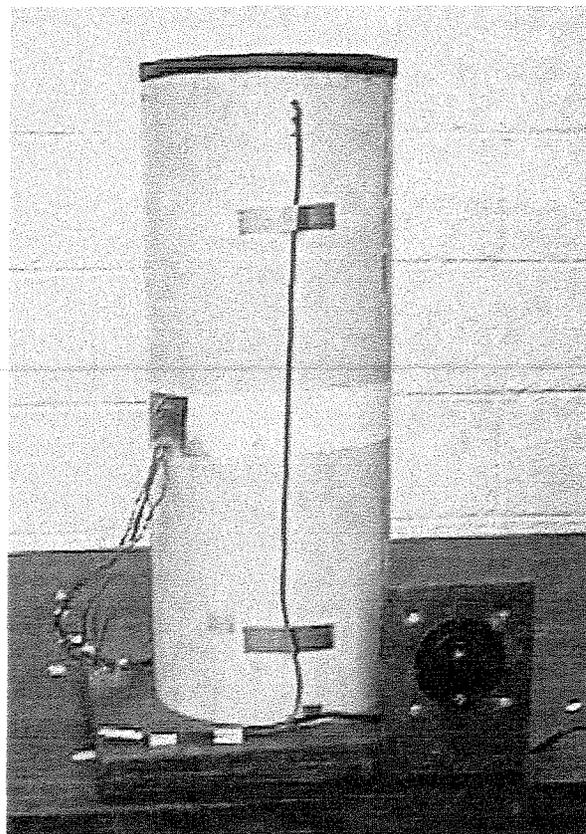
$$P_r = U \cdot i \quad (5)$$

As figuras (22), (23) e (24), mostram o equipamento utilizado no experimento.

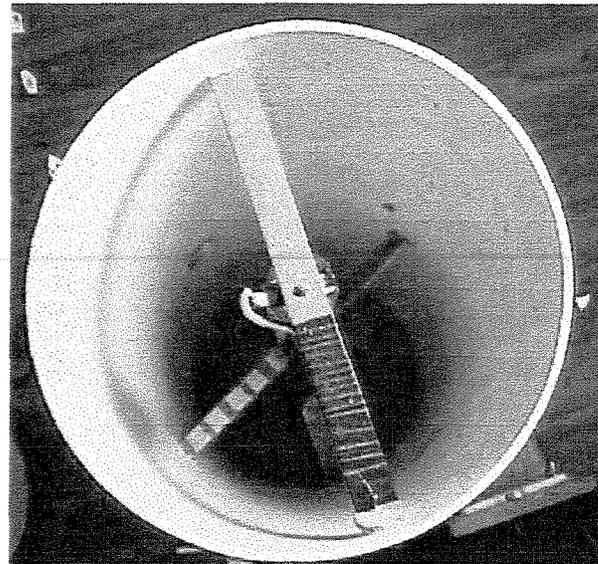


Fonte: PARK, ALONSO e NUNES (1998).

Figura 22: Esquema de montagem do equipamento.



Vista Frontal do equipamento



Vista superior do equipamento mostrando a disposição dos termopares

Figura 23 e Figura 24: Aspecto do equipamento utilizado para o método do regime permanente.

4.1.6.3. Método do Equilíbrio Dinâmico

4.1.6.3.1. Equipamento

O equipamento de fluxo radial de calor em questão foi idealizado e construído através de informações obtidas com JACKSON (1957), DAL FABBRO e NUNES (1999) e NUNES, PARK e DAL FABBRO (1999) os quais descrevem o método do equilíbrio dinâmico (quasy-steady state) para a obtenção das constantes térmicas, (respectivamente em coordenadas cartesianas e em coordenadas cilíndricas), podendo prever uma maior uniformidade de distribuição de calor em condições experimentais através do fluxo radial em coordenadas cilíndricas. O equipamento idealizado, restringe o fenômeno de difusão de calor à dimensão radial.

Conforme indicado na figura 25, o equipamento contém um tubo de cobre (5) com 11 mm de diâmetro interno e 1.200 mm de comprimento. Conectado a este tubo através de duas válvulas solenóides (3 e 7) de rápido fechamento acionadas eletricamente, existem dois recipientes (1 e 2), um contendo água quente e outro água fria. O tubo de cobre encontra-se inserido no centro de um tubo de PVC (6) de 200 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento cujas duas extremidades são vedadas só permitindo a saída das conexões que ligam o tubo de cobre às válvulas solenóides. O equipamento dispõe também de uma bomba de água centrífuga (4) de 0,25 HP que executa a circulação de água quente e fria através do tubo de cobre e o retorno da mesma a seus respectivos recipientes e de uma câmara (8) que envolve o cilindro de PVC mantendo sua temperatura externa constante através de uma resistência e ventiladores. As duas válvulas solenóides são responsáveis por alternar a distribuição de água quente ou fria no interior do tubo de cobre.

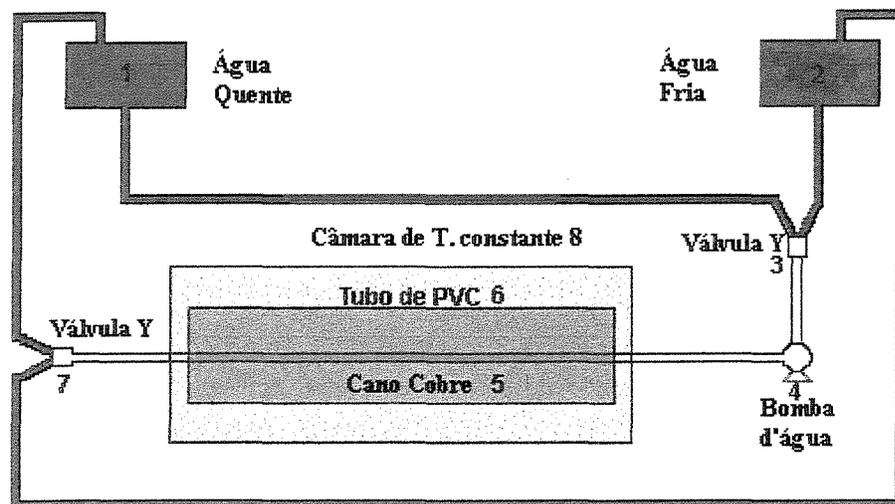


Figura 25: Aspecto dos componentes do equipamento.

A água foi aquecida dentro do aquecedor de acúmulo e no outro recipiente a água permaneceu à temperatura ambiente (água fria). No interior do tubo de PVC foram colocados os materiais para a obtenção de suas constantes térmicas, o cilindro e o aquecedor de acúmulo podem ser observados na figura (26). Dentro do mesmo tubo existe 16 termopares de Cobre-Constantan para registrar as variações das temperaturas como mostra a figura (29). Os termopares foram dispostos radialmente e longitudinalmente no cilindro de PVC e dispostos em

seu interior de forma que se tenha um termopar distante a cada 2 cm do centro do cilindro, como pode-se observar nas figura (28) e (29). Os termopares foram acoplados a um sistema de aquisição de dados, como demonstra a figura (27). O projeto do equipamento com as cotas e em escala é apresentado no Apêndice.

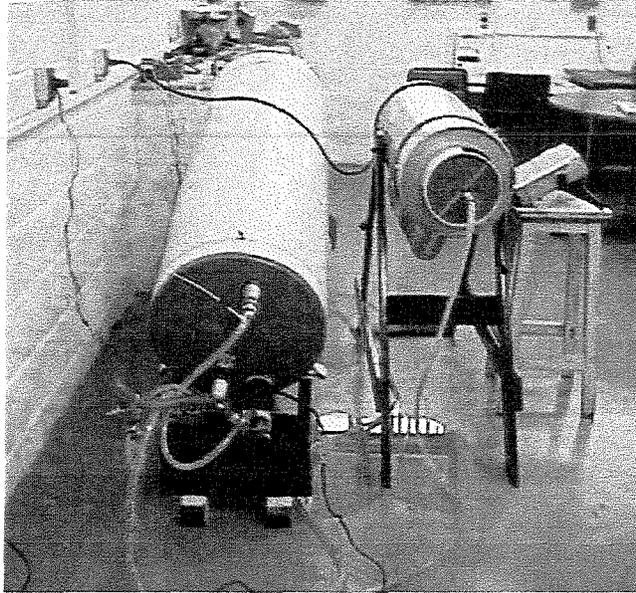


Figura 26: Vista frontal do aquecedor elétrico de acúmulo, do cilindro de PVC e da câmara de temperatura constante.

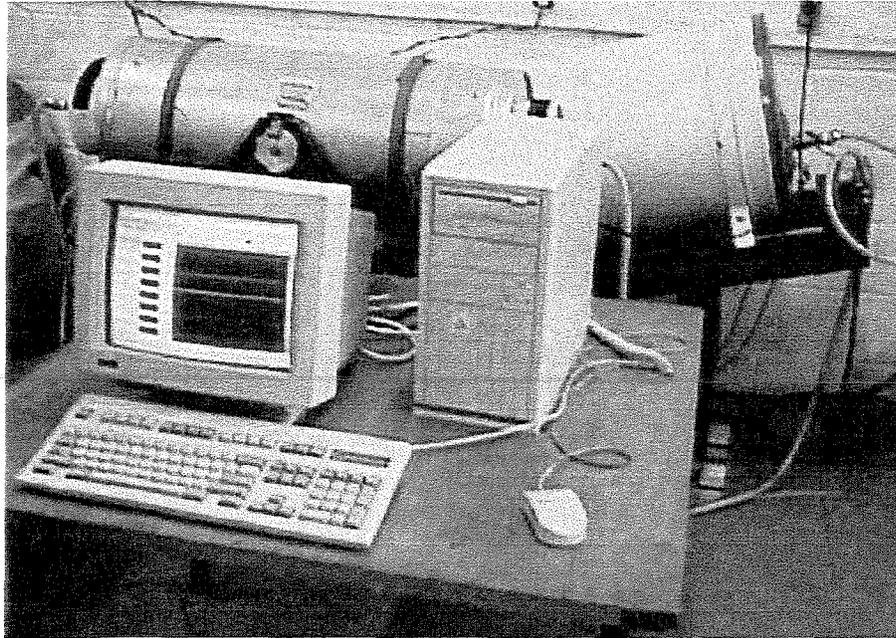


Figura 27: Aspecto do sistema de aquisição de dados.

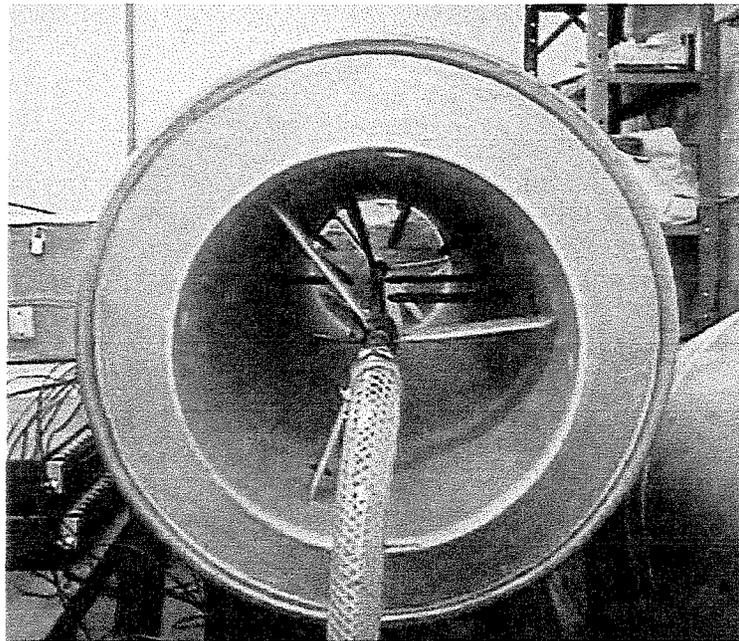


Figura 28: Aspecto frontal do cilindro de PVC, da câmara de temperatura constante e do tubo de cobre, podendo se observar os termopares.

A câmara de temperatura constante foi ajustada de modo a se manter a temperatura externa do tubo de PVC num valor igual a metade da amplitude da temperatura do tubo de cobre.

A figura (29) mostra a vista da câmara de temperatura constante e a posição dos termopares no cilindro de PVC.

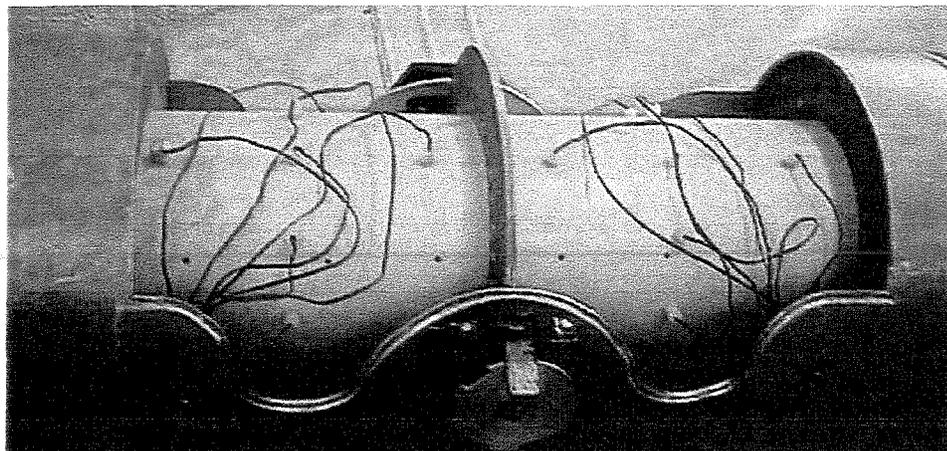


Figura 29: Vista da câmara de temperatura constante e posição dos termopares.

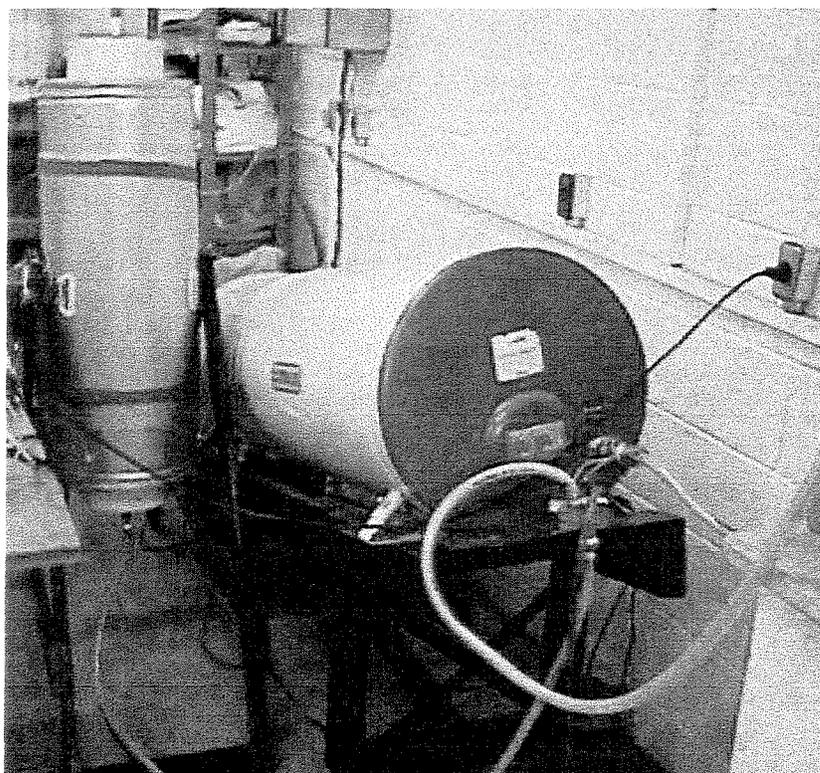


Figura 30: Vista frontal do aquecedor elétrico de acúmulo e do cilindro de PVC em posição vertical para colocação e/ou retirada do material testado

4.1.6.3.2. Funcionamento do Equipamento

A preparação do equipamento para os testes consiste dos seguintes procedimentos:

- Colocação das amostras dos materiais no interior do cilindro de PVC. A colocação foi realizada com cuidado de modo a não deslocar os termopares de sua posição pré-determinada no interior do cilindro, e de modo a preencher o cilindro como um todo, a figura (30) mostra o cilindro de PVC em posição para colocação e/ou retirada do material testado;
- acionamento do aquecedor elétrico para o aquecimento da água;
- acionamento da linha de água fria;
- acionamento da bomba de água e das válvulas solenóides pela corrente elétrica;
- os termopares foram conectados ao sistema de aquisição de dados;
- a resistência elétrica e os ventiladores da câmara de temperatura constante foram acionados;

Realizadas essas operações o equipamento estava apto a funcionar. Foram selecionados cinco períodos diferentes de ondulação de temperatura: 60, 300, 600, 900 e 1200 segundos através de um Timer que acionava as válvulas solenóides dirigindo o sentido do fluxo de água. Cada período corresponde ao tempo em que a água quente ou fria permaneceu circulando no interior do tubo de cobre.

Selecionado o período, a bomba de água executou a circulação da água no interior do tubo de cobre e o seu retorno para o respectivo recipiente. A alternância de circulação de água quente ou fria no equipamento foi feita através do acionamento das válvulas solenóides que realizaram o fechamento de um circuito para a abertura de outro promovendo a troca das águas de diferentes temperaturas no interior do tubo de cobre. A figura (31) mostra o aspecto da bomba e das válvulas solenóides.

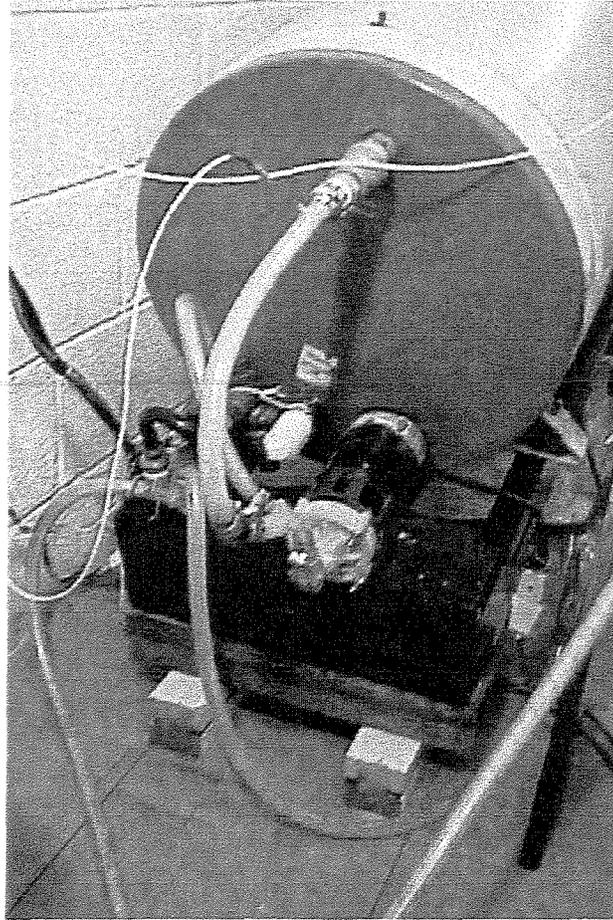


Figura 31: Vista da bomba de água e de uma válvula solenóide.

As leituras de temperaturas dos termopares dispostos no tubo de PVC foram tomadas depois do equipamento ser acionado permitindo que o material atingisse o estado de equilíbrio dinâmico (quasy-steady state).

A possibilidade de alternância entre a circulação de água quente e fria dentro do tubo de cobre localizado no interior do cilindro de PVC criou uma curva senoidal da temperatura no sólido testado. Essa função senóide tem uma amplitude máxima na superfície externa do tubo de cobre e um valor mínimo de amplitude (praticamente zero) na superfície interna do cilindro de PVC.

A obtenção dos dados experimentais de temperatura dos termopares foi registrada por um sistema de aquisição de dados acoplado a um micro computador, conforme demonstra figura (27).

4.1.6.3.3. Montagem do Sistema Elétrico de Controle

O sistema elétrico consiste do quadro de força do equipamento que possui três circuitos independentes. Um controla a temperatura da água que sai do aquecedor elétrico através de um sensor PT 100 ligado a um micro-processador de controle de temperatura que liga e desliga o aquecedor de acordo com a temperatura da água, mantendo a mesma a uma temperatura constante. A figura (32) mostra o aspecto do quadro de força e os componentes de controle do equipamento. Outro circuito controla a temperatura da câmara de temperatura constante através de um sensor PT 100 ligado a um micro-processador de controle de temperatura que liga ou desliga a resistência elétrica localizada no interior da câmara, mantendo a temperatura externa do cilindro de PVC constante, este mesmo circuito quando acionado liga os ventiladores da câmara responsáveis pela circulação do ar quente no interior da câmara.

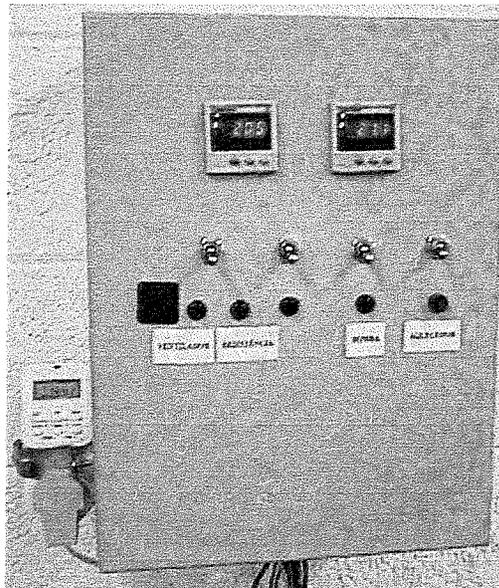


Figura 32: Aspecto do quadro de força com as chaves “on-off, os controladores microprocessadores de controle de temperatura e Timer.

Outro circuito controla acionamento das válvulas solenóides através de um Timer Digital programável que liga ou desliga as válvulas de acordo com o período selecionado

Cada contator do sistema é controlado por uma chave *on-off*, existem também lâmpadas piloto que indicam se o circuito está ligado ou desligado.

4.1.6.3.4. Metodologia de Cálculo

Diversos autores utilizaram diferentes soluções para o cálculo das constantes térmicas pelo método do equilíbrio dinâmico, entre eles pode-se citar JACKSON (1957), TERESO (1980) que utilizaram o método para o cálculo das constantes térmicas do solo em coordenadas cartesianas, KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH (1981) que utilizaram o método para o cálculo das constantes térmicas de grãos em cilindros concêntricos com geração interna de calor, e DAL FABRO e NUNES (1999) que utilizou a solução proposta por ÖZIGIK (1968) para o cálculo da difusividade térmica de solos.

Para o cálculo da condutividade e difusividade térmica, optou-se em analisar somente a componente transiente do equilíbrio dinâmico conseguido experimentalmente na subida de temperatura, devido à acuidade dos dados experimentais.

A solução transiente proposta por CARSLAW e JAEGER (1959) é dada pela equação:

$$v = \frac{2V}{R} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-DB} \frac{J_0(rB)}{BJ_1(RB)} \quad (99)$$

Para o cálculo da difusividade térmica utilizou-se os dados do último incremento de temperatura do termopar mais próximo ao cano de cobre, localizado no interior do cilindro, obtendo-se os valores das funções de Bessel (J_0 e J_1) e o adimensional de temperatura foi calculado pela relação:

$$v = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \quad (100)$$

O valor de T_0 foi considerado como sendo o valor dos dados experimentais da temperatura do cano de cobre localizado no interior do cilindro.

O valor de T_{∞} corresponde ao valor da temperatura ambiente.

Utilizando um termo da equação (100) chega-se na seguinte equação:

$$v = \frac{0.77119904303086821}{\exp^{0,787766303844 * D * t}} \quad (101)$$

Inserindo a equação (102) no software de análise estatística Statistica (1995), pode-se determinar o valor da difusividade térmica para os diferentes materiais testados.

V. RESULTADOS

5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

O quadro (6) apresenta os resultados das propriedades físicas dos materiais testados.

Quadro 6: Resultados das propriedades físicas dos materiais testados.

Produto	ρ (g/m ³)	densid. aparent. (g/m ³)	diâmet. médio (mm)	ε	UBU Sonda (kg/kg)	UBU Eq. Dinâmico (kg/kg)	UBU Permanent e (kg/kg)
Soja Inteira Seca	1,17	0,71	5,44	0,39	0,081	0,081	0,079
Soja Moída Seca	1,22	0,52	1,12	0,57	0,104	0,104	0,097
Soja Fubá Seca	1,20	0,57	0,6	0,52	0,098	0,098	0,099
Soja Inteira Interm.	1,16	0,71	6,05	0,39	0,139	0,139	0,137
Soja Moída Interm.	1,16	0,56	1,15	0,52	0,131	0,131	0,131
Soja Fubá Interm.	1,17	0,54	0,78	0,54	0,136	0,136	0,136
Soja Inteira Úmida	1,14	0,68	5,97	0,40	0,210	0,210	0,219
Soja Moída Úmida	1,18	0,51	1,38	0,56	0,183	0,183	0,175
Soja Fubá Úmida	1,18	0,51	0,94	0,56	0,189	0,189	0,189

5.1.1. DENSIDADE REAL

Os resultados para as diferentes amostras se encontram na figura (33). Os resultados em forma de tabela se encontram no apêndice em disquete.

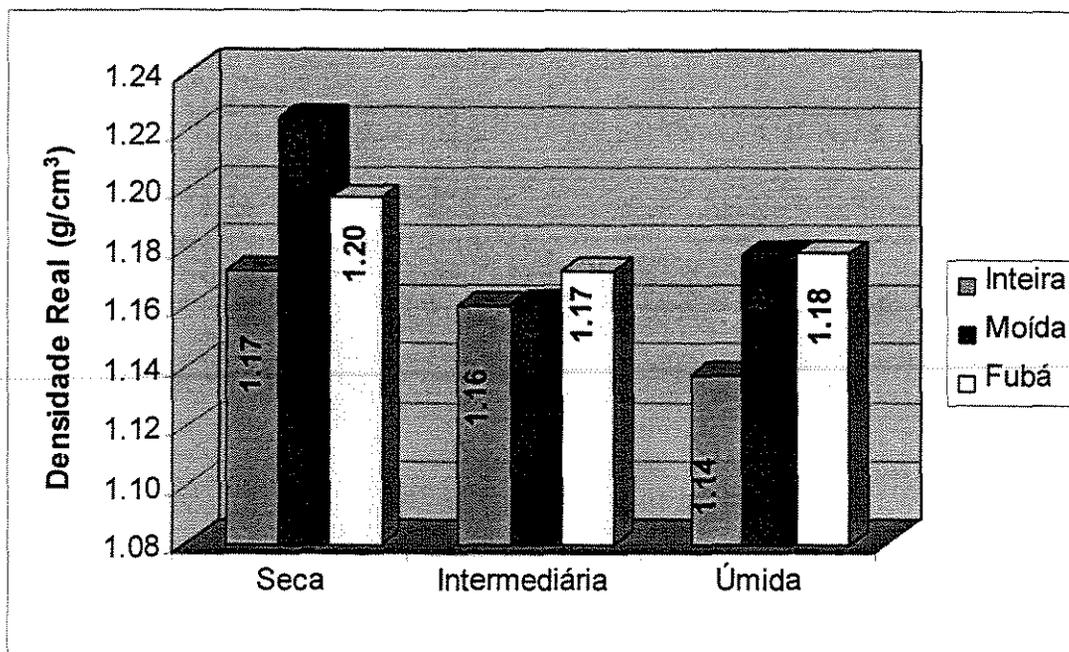


Figura 33: Comparação dos valores de densidade real para as diferentes amostras testadas.

Conforme pode ser observado na figura (33) e no quadro 5, o diâmetro médio e o teor de umidade dos materiais testados tem efeito significativo sobre os valores da densidade real.

5.1.2. DENSIDADE APARENTE

Os resultados encontram-se na figura (34). Os resultados em forma de tabela se encontram no apêndice em disquete.

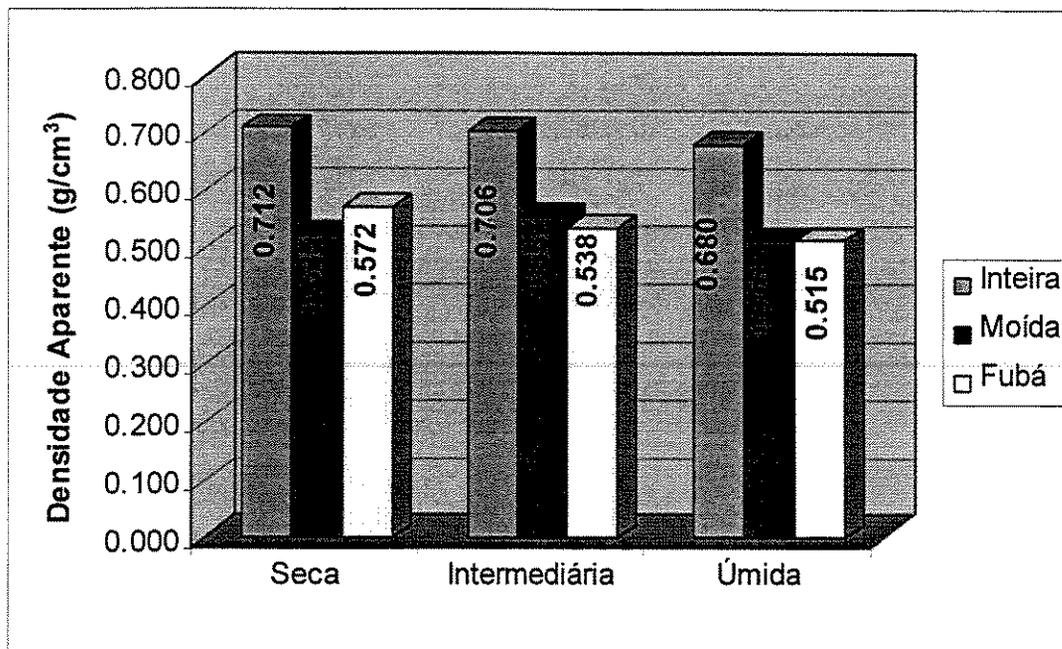


Figura 34: Comparação dos valores de densidade aparente para os diferentes materiais testados.

Pode se observar na figura (34) e na análise do quadro 5 que o diâmetro médio e o teor de umidade dos materiais testados tem um efeito significativo sobre os valores da densidade aparente.

O valor encontrado em literatura (ASAE STANDARDS, 1990), foi de $0,772 \text{ g/cm}^3$ para a soja grão inteira (772 kg/m^3) mostrando que os resultados obtidos experimentalmente estão condizentes.

5.1.3. DIÂMETRO MÉDIO DA PARTÍCULA

A comparação entre os diâmetros equivalentes das diferentes amostras testadas se encontram na figura (35).

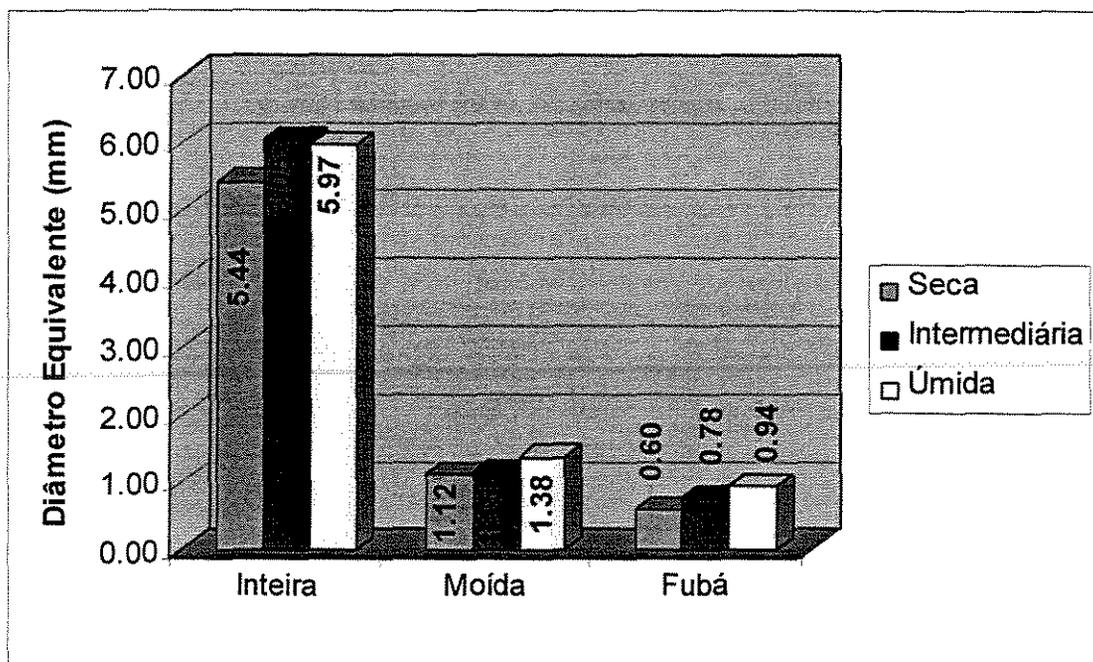


Figura 35: Comparação dos valores de diâmetro equivalente para os diferentes materiais testados.

A soja foi testada em três diâmetros diferentes pois quanto menor o diâmetro equivalente do material maior a sua porosidade, e um dos objetos deste trabalho é verificar o efeito da porosidade sobre o valor das propriedades térmicas da soja. Logo, foi necessário determinar o diâmetro médio dos materiais para melhor caracterizá-los fisicamente.

5.1.4. POROSIDADE

A comparação entre as porosidades dos diferentes materiais testados se encontra na figura (36).

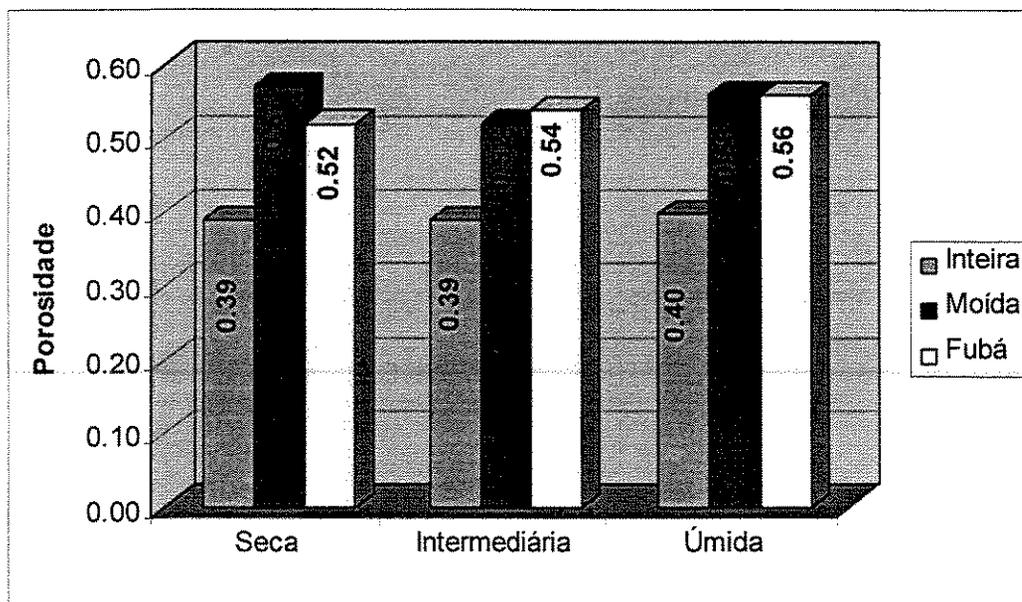


Figura 36: Comparação dos valores de porosidade para os diferentes materiais testados.

Conforme pode-se observar, a porosidade da soja moída e fubá com relação a soja inteira aumenta. As porosidades da soja moída e fubá mostraram-se semelhantes, provavelmente devido a não compactação do material durante o teste. De uma maneira geral, quanto menor a granulometria do material testado, maior sua porosidade.

5.1.5. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade final das diferentes dos materiais submetidos a umidificação encontram-se nas figuras (37) e (38).

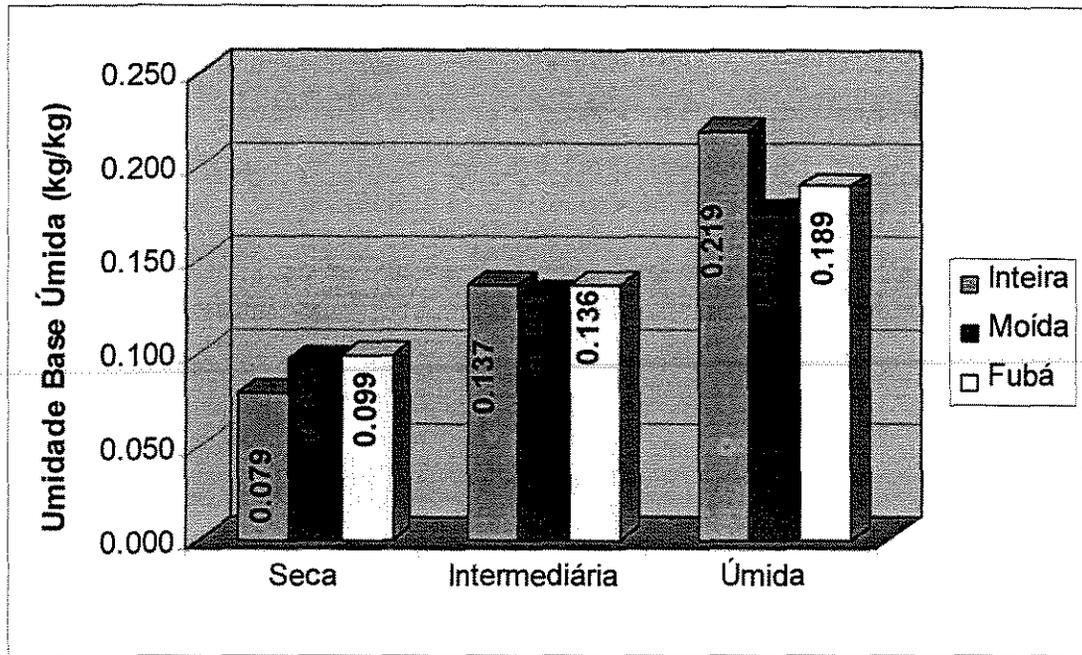


Figura 37: Comparação dos teores de umidade em base úmida para as diferentes materiais testados pelo Método do Regime Permanente.

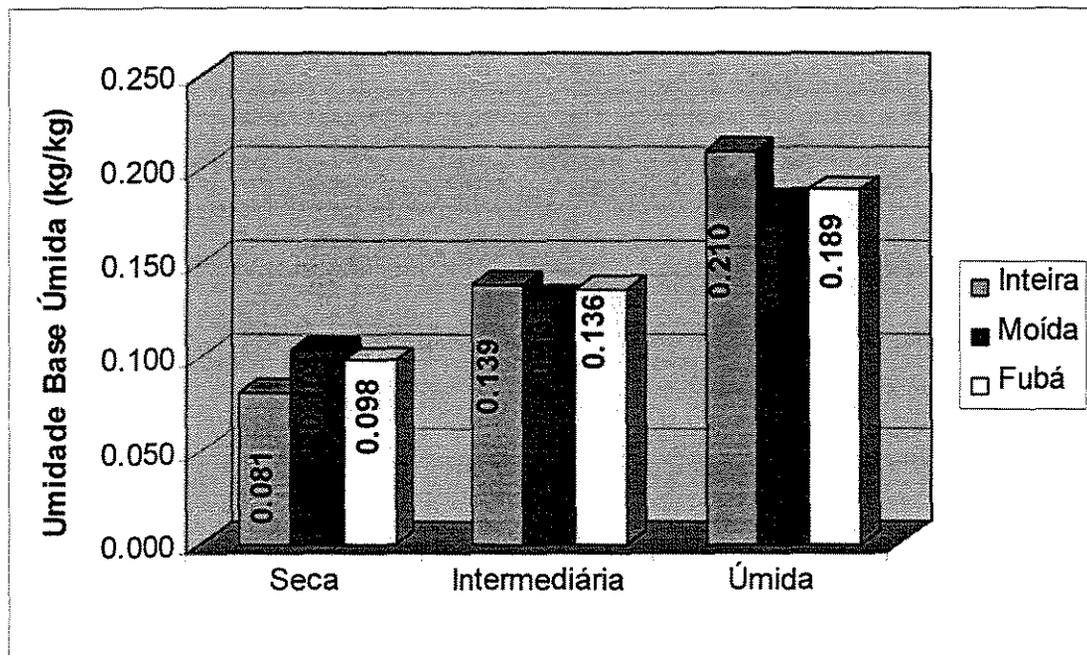


Figura 38: Comparação dos teores de umidade em base úmida para os diferentes materiais testados pelo Método da Sonda e pelo Método do Equilíbrio Dinâmico.

Como podemos observar, os teores de umidade em base úmida atingidos para os materiais atenderam o objetivo inicial, portanto o método de umidificação utilizado se mostrou satisfatório.

5.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS

5.2.1. MÉTODO DA SONDA (REGIME TRANSIENTE)

Os diferentes materiais testados no equipamento para a determinação das propriedades térmicas pelo método da sonda (regime Transiente), foram submetidos as condições experimentais apresentadas no quadro (7).

Quadro 7: Condições Experimentais.

Produto	Intervalo de leitura (s)	L do fio (m)	I (A)	V (V)	UBS (kg/kg)	UBU (kg/kg)
Soja Inteira Seca	5	0,13	0,26	4,94	0.0881	0.0810
Soja Moída Seca	5	0,13	0,26	5,10	0.1162	0.1041
Soja Fubá Seca	5	0,13	0,27	5,18	0.1089	0.0982
Soja Inteira Interm.	5	0,13	0,26	4,93	0,1613	0.1389
Soja Moída Interm	5	0,13	0,27	5,03	0,1511	0,1312
Soja Fubá Interm.	5	0,13	0,25	5,00	0,1577	0,1362
Soja Inteira Úmida	5	0,13	0,27	5,02	0,2661	0,2102
Soja Moída Úmida	5	0,13	0,28	5,09	0,2240	0,1830
Soja Fubá Úmida	5	0,13	0,26	5,07	0,2332	0,1891

Os dados e os gráficos obtidos experimentalmente e da variação da temperatura em função do tempo para os diferentes materiais testados se encontram no apêndice em disquete.

Os gráficos da variação da temperatura em função do ln do tempo dos experimentos e sua correlação são apresentados nas figuras (39) a (47).

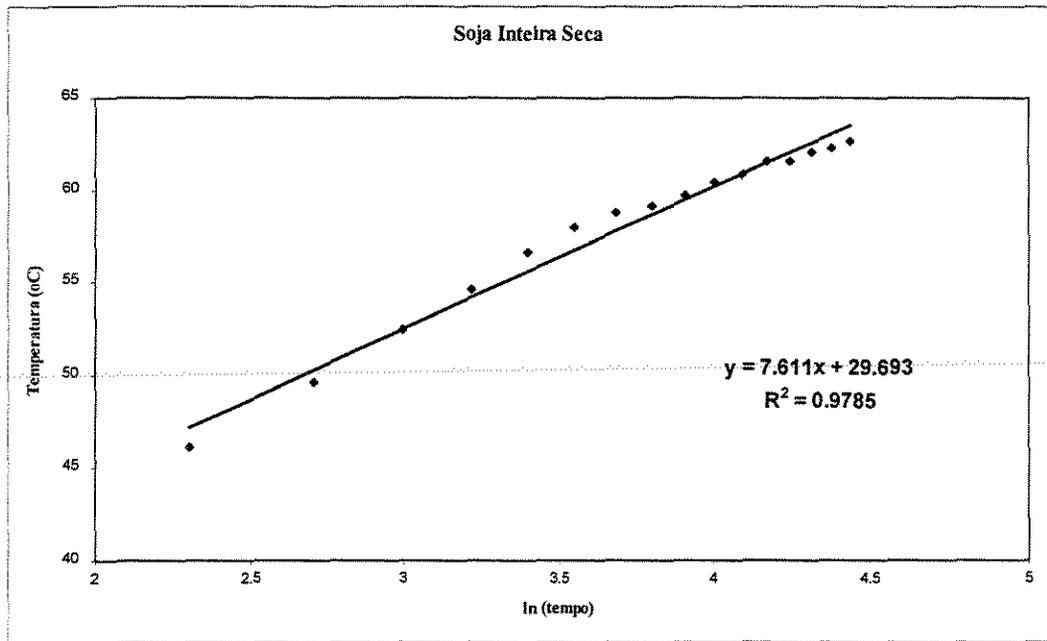


Figura 39: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Inteira Seca.

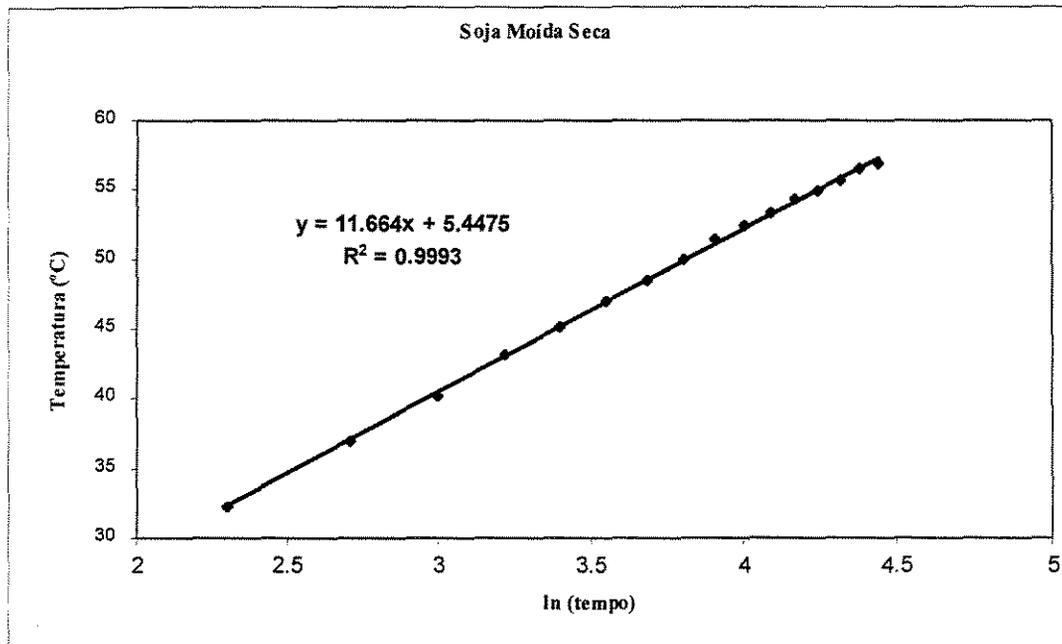


Figura 40: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Moída Seca.

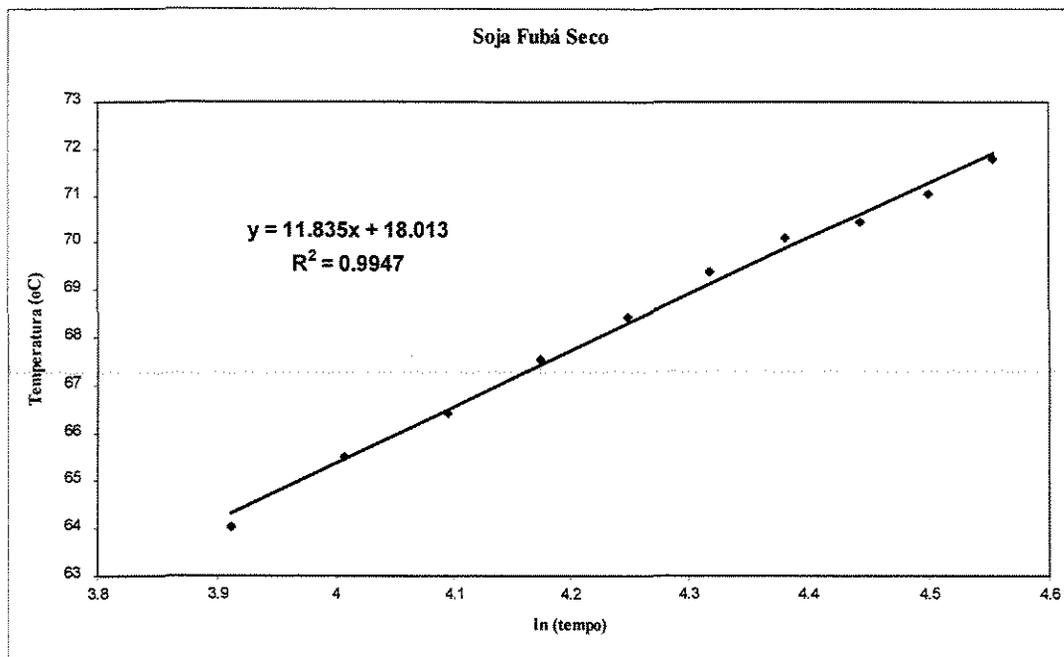


Figura 41: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Fubá Seco.

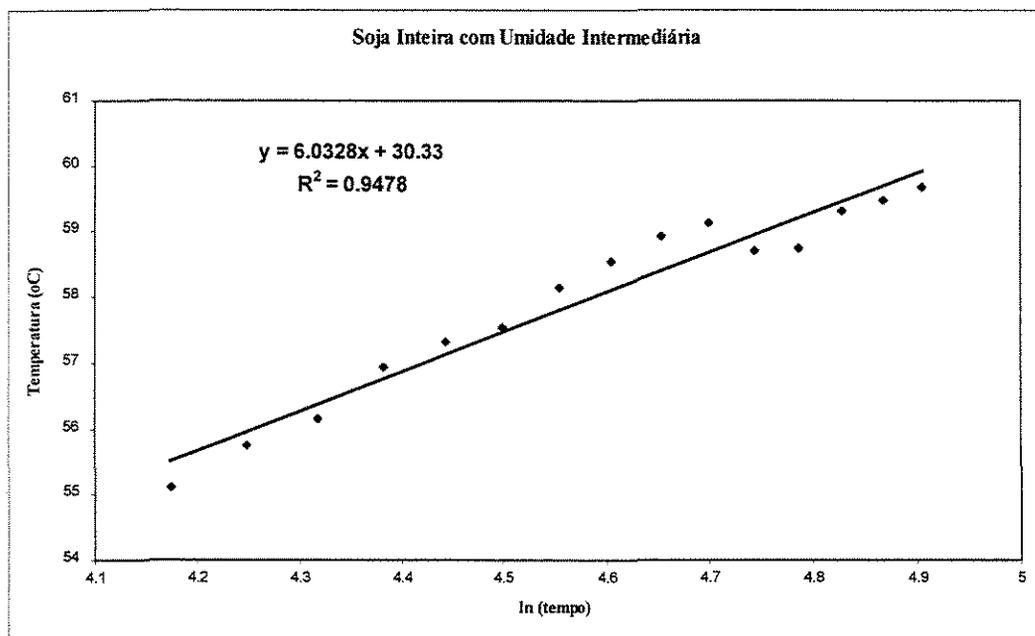


Figura 42: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Inteira Intermediária.

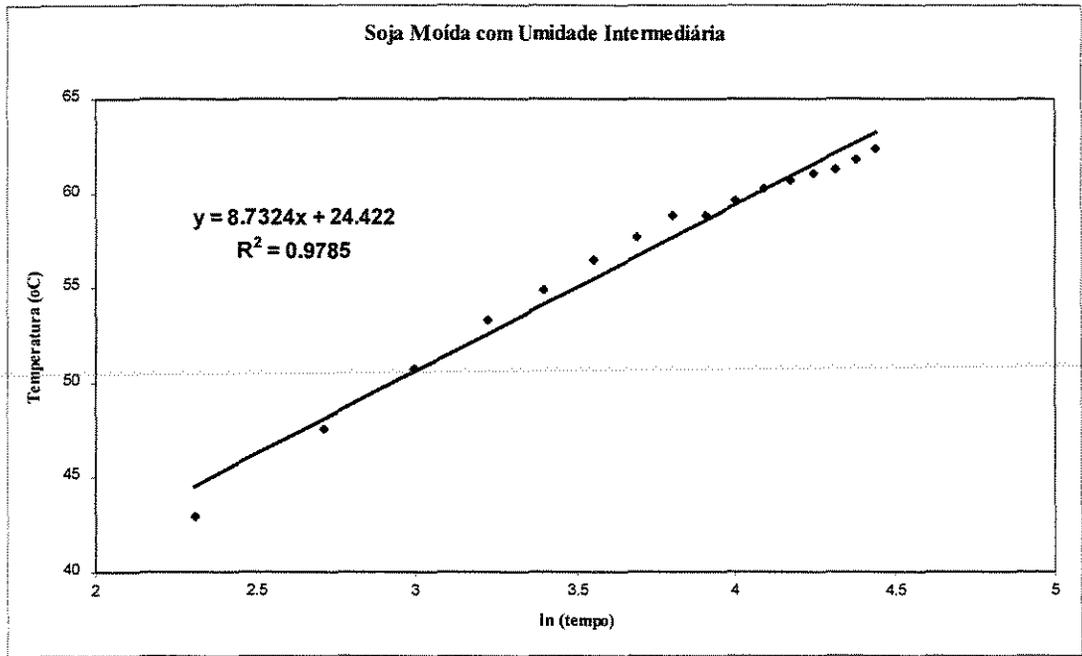


Figura 43: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Moída Intermediária.

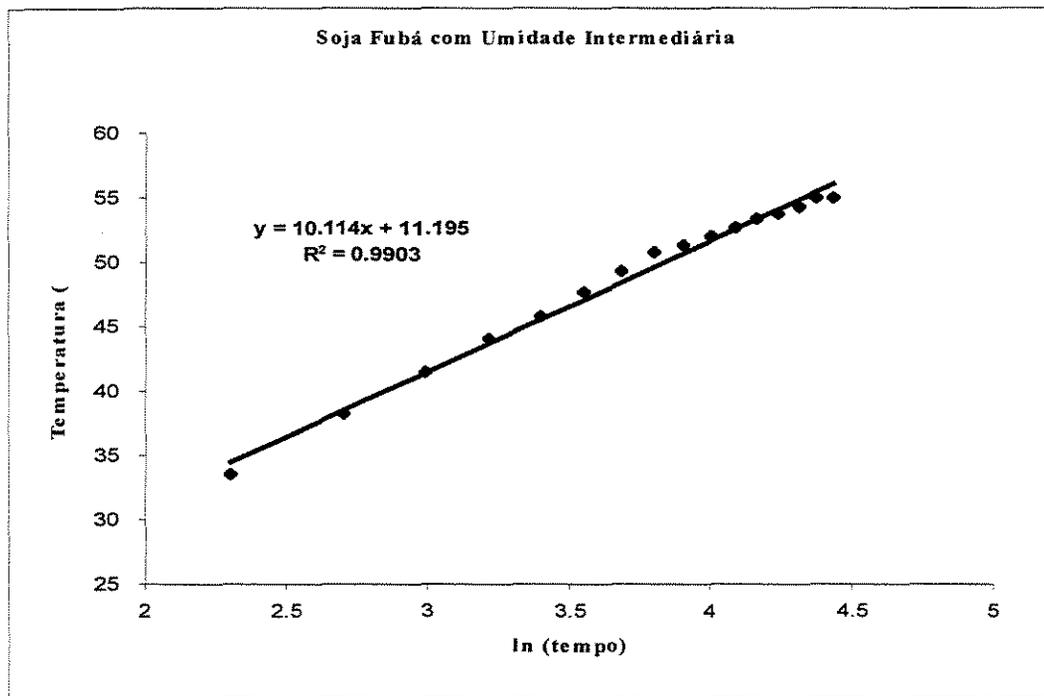


Figura 44: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Fubá Intermediária.

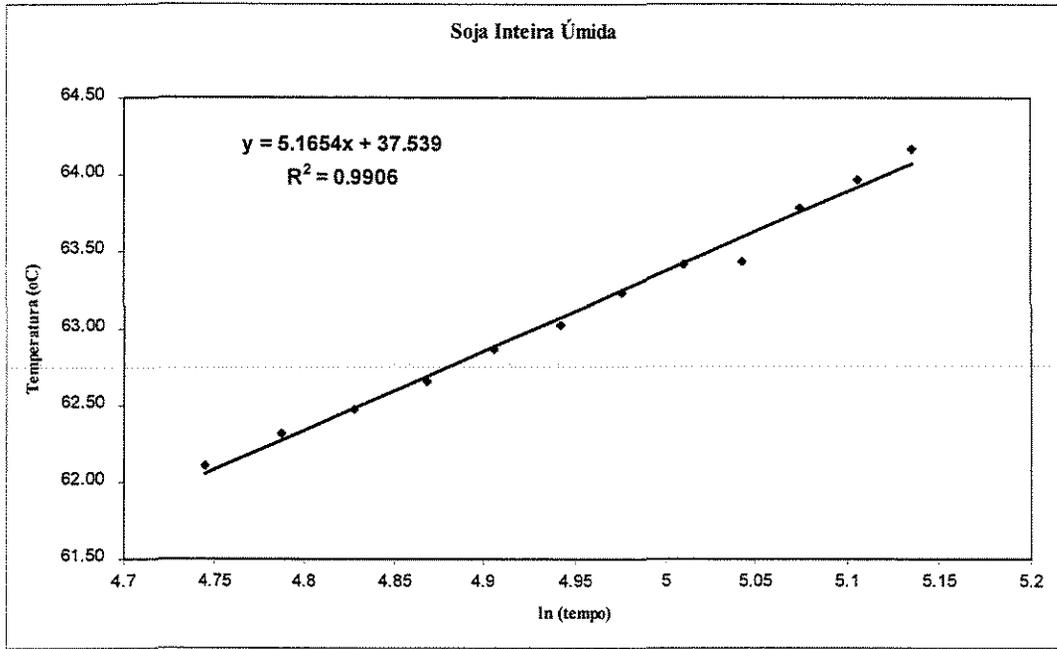


Figura 45: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Inteira Úmida.

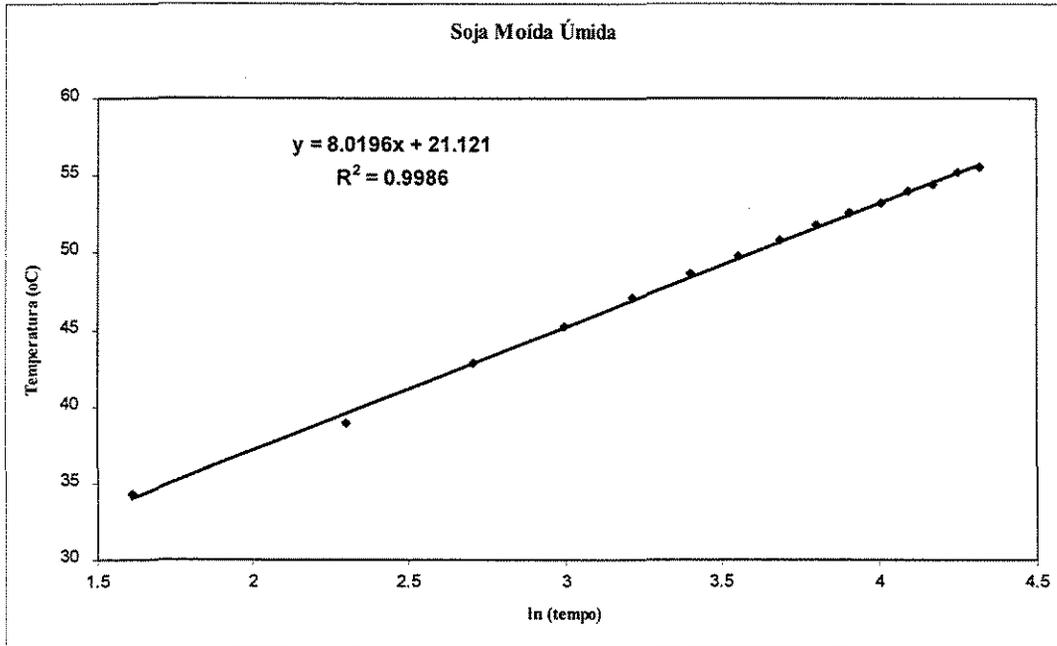


Figura 46: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Moída Úmida.

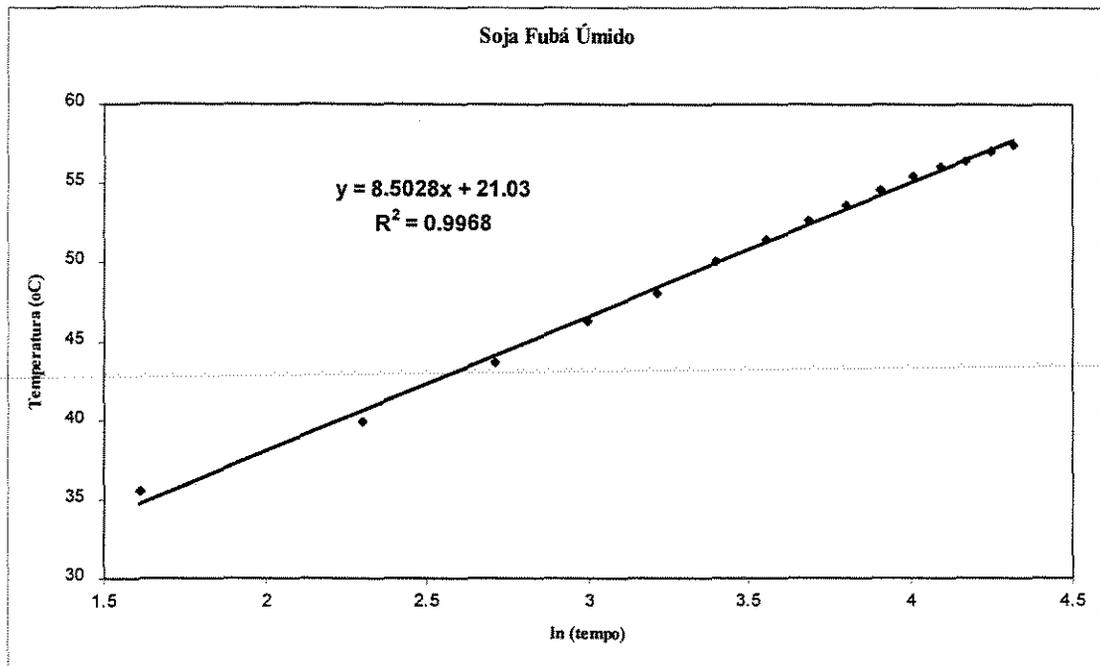


Figura 47: Variação da temperatura em função do ln do tempo para a Soja Fubá Úmida.

Com os valores da potência elétrica (q), e do coeficiente angular da reta (m) de cada experimento, pode-se calcular o valor da condutividade térmica utilizando a equação (98). Os valores da condutividade térmica para cada um dos experimentos foi calculado utilizando-se o intervalo que forneceu a maior linearidade possível. Pode-se observar que os valores dos coeficientes de correlação (R^2) dos dados linearizados são altos, demonstrando bom ajuste.

Desta forma o quadro (8) apresenta os valores da condutividade térmica calculados para o método da Sonda Linear.

Quadro 8: Resultados obtidos da Condutividade Térmica pelo método da sonda.

Produto	Potência elétrica (J/s)	q (J/ms)	m	k W/m°C
Soja Inteira Seca	1,28	4,94	7,611	0,103
Soja Moída Seca	1,33	5,10	11,66	0,070
Soja Fubá Seca	1,39	5,38	11,83	0,072
Soja Inteira Interm.	1,28	4,93	6,033	0,130
Soja Moída Interm	1,36	5,22	8,732	0,095
Soja Fubá Interm.	1,25	4,81	9,72	0,079
Soja Inteira Úmida	1,36	5,21	5,165	0,161
Soja Moída Úmida	1,43	5,09	9,153	0,095
Soja Fubá Úmida	1,32	5,07	8,503	0,095

JASANSKY e BILANSKY (1973), determinaram os valores de condutividade térmica da soja inteira, moída e fubá e umidade entre 9,4 e 11,2 % em base úmida pelo método da sonda, obtendo valores entre 0,069-0,130 W/m°C (0,04-0,075 Btu/h ft °F). Comparando-se os valores da literatura com os resultados experimentais do método da sonda pode-se constatar que os resultados encontram-se dentro da faixa de valores citada. Por este motivo, os resultados deste método da sonda em regime transiente para determinação das propriedades térmicas de grão de soja foi considerado como padrão para avaliar a precisão dos outros métodos de determinação utilizados no trabalho.

A relação entre o valores encontrados para a condutividade térmica e os diferentes valores de umidade em base seca e base úmida e diâmetro médio dos materiais testados são apresentados nas figuras (48) e (49).

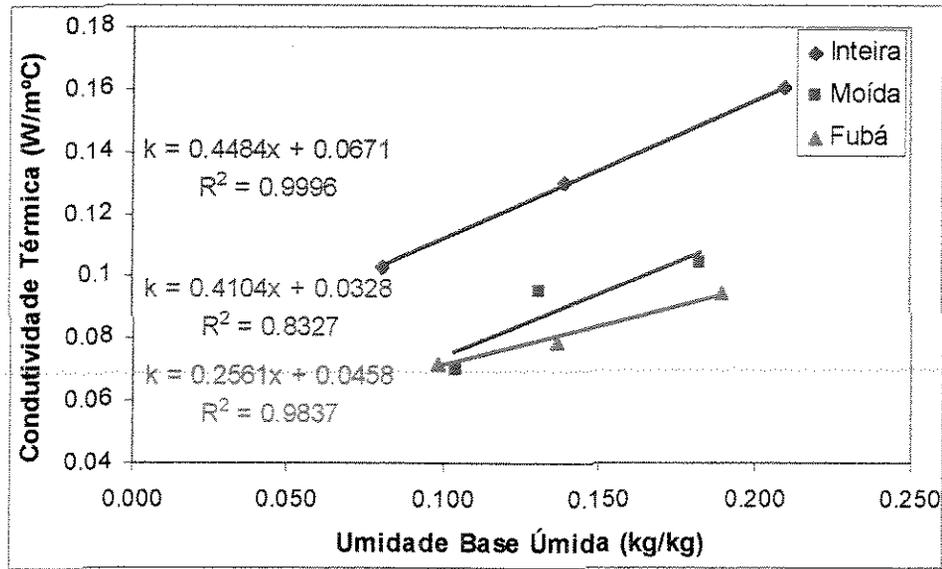


Figura 48: Relação entre a condutividade térmica e o conteúdo de umidade para o método da sonda.

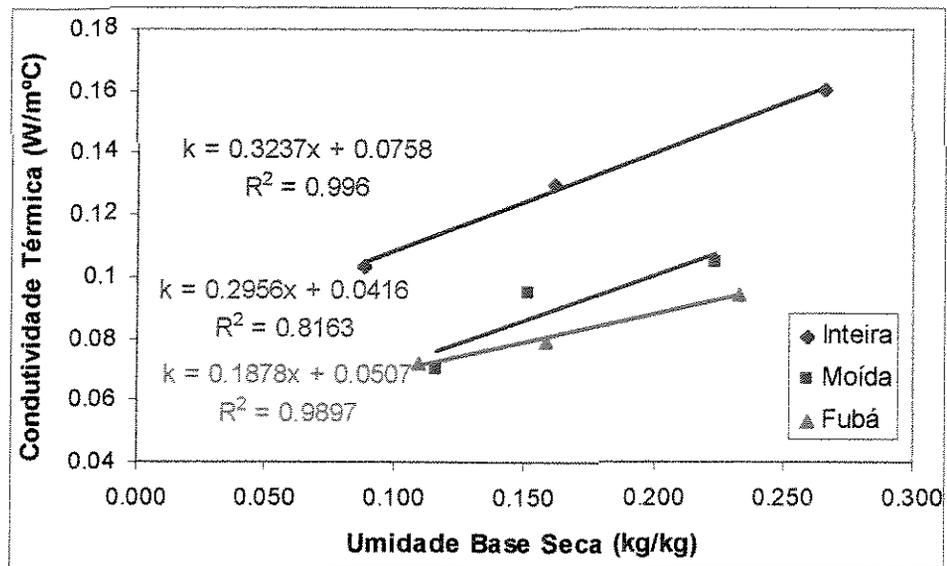


Figura 49: Relação entre a condutividade térmica e o conteúdo de umidade para o método da sonda.

Conforme pode ser observado, a condutividade térmica aumenta com o teor de umidade dos materiais testados, isto se deve ao fato de que a condutividade térmica da água é maior que a do ar, portanto, quanto maior o conteúdo de umidade do material, maior será a contribuição da água sobre o valor da condutividade térmica, aumentando consequentemente os valores dos materiais.

A relação entre os valores encontrados para a condutividade térmica e os diferentes valores de diâmetro médio dos materiais testados são apresentados na figura (50).

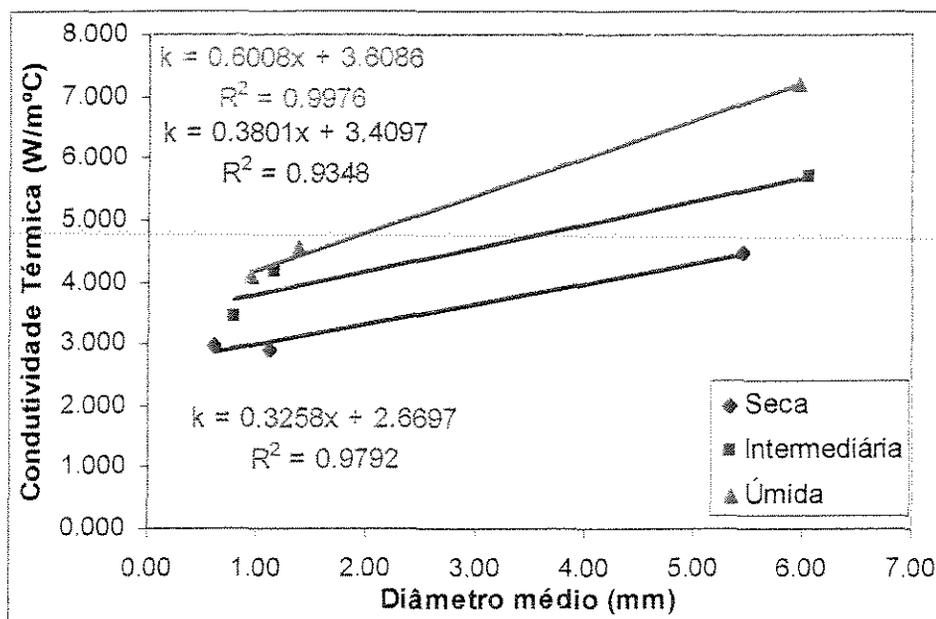


Figura 50: Relação entre os valores de condutividade térmica o diâmetro médio da partícula para o método da sonda.

Pode-se notar pela figura (50) que o diâmetro da partícula influencia o valor da condutividade térmica, tal fato deve estar relacionado a porosidade, pois pode-se observar que quanto maior o diâmetro (soja inteira *versus* soja moída e fubá) do material menor a sua porosidade. A figura também apresenta as equações de linearização dos dados e os valores dos coeficientes de correlação (R^2).

A relação entre os valores encontrados para a condutividade térmica e os diferentes valores de porosidade dos materiais testados são apresentados na figura (51).

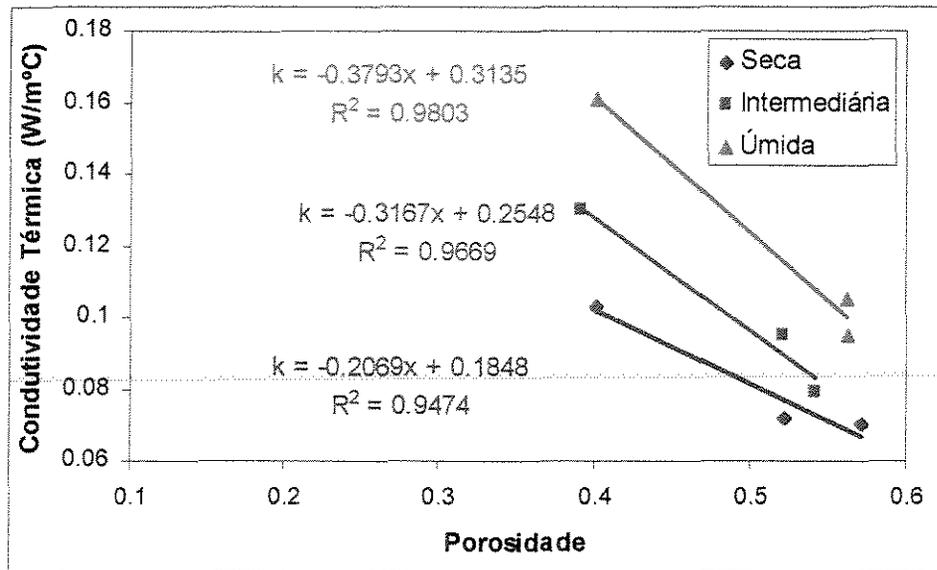


Figura 51: Relação entre a condutividade e a porosidade para o método da sonda

Conforme pode ser observado, o valor da condutividade térmica decresce com o aumento da porosidade, fato constatado por JASANSKY e BILANSKI (1973) para a soja, e por KUSTERMAN, SCHERER e KUTZBACH (1981) para o milho. Isto se deve ao fato de que quanto maior a porosidade, maior a quantidade de ar presente nos poros do material. Tendo o ar uma baixa condutividade térmica, quanto mais um material possuir ar, menor será o valor da sua condutividade térmica. Na figura (51) também são apresentas as equações de linearização dos dados, todas apresentando um bom valor de coeficiente de correlação (R^2).

O valor da difusividade térmica para o método da sonda foi calculado pela equação (2) utilizando os valores de condutividade térmica calculados e apresentados no quadro (8), da densidade real (ρ) determinada experimentalmente conforme o quadro (6) e da capacidade calorífica (C_p) encontrada na literatura. Os valores calculados de difusividade térmica para o método da sonda dos materiais testados são apresentados no quadro (9).

Quadro 9: Valores calculados de difusividade térmica para o método da sonda

Produto	ρ (kg/m ³)	Cp (kJ/kg °C)	k (W/m°C)	D (m ² /s)
Soja Inteira Seca	1173	1970	0,103	4,457E-08
Soja Moída Seca	1225	1970	0,070	2,901E-08
Soja Fubá Seca	1197	1970	0,072	3,053E-08
Soja Inteira Interm.	1160	1970	0,130	5,689E-08
Soja Moída Interm	1161	1970	0,095	4,153E-08
Soja Fubá Interm.	1172	1970	0,079	3,420E-08
Soja Inteira Úmida	1137	1970	0,161	7,186E-08
Soja Moída Úmida	1178	1970	0,105	4,525E-08
Soja Fubá Úmida	1178	1970	0,095	4,092E-08

A relação entre o valores encontrados para a difusividade térmica e os diferentes valores de umidade, diâmetro médio e porosidade dos materiais testados são apresentados nas figuras (52), (53) e (54).

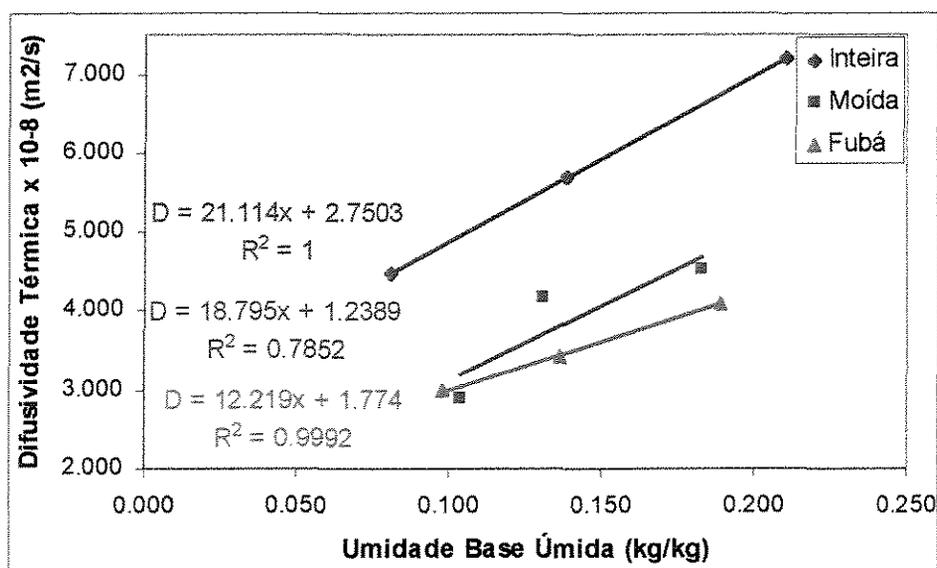


Figura 52: Relação entre os valores de difusividade térmica e o conteúdo de umidade para o método da sonda.

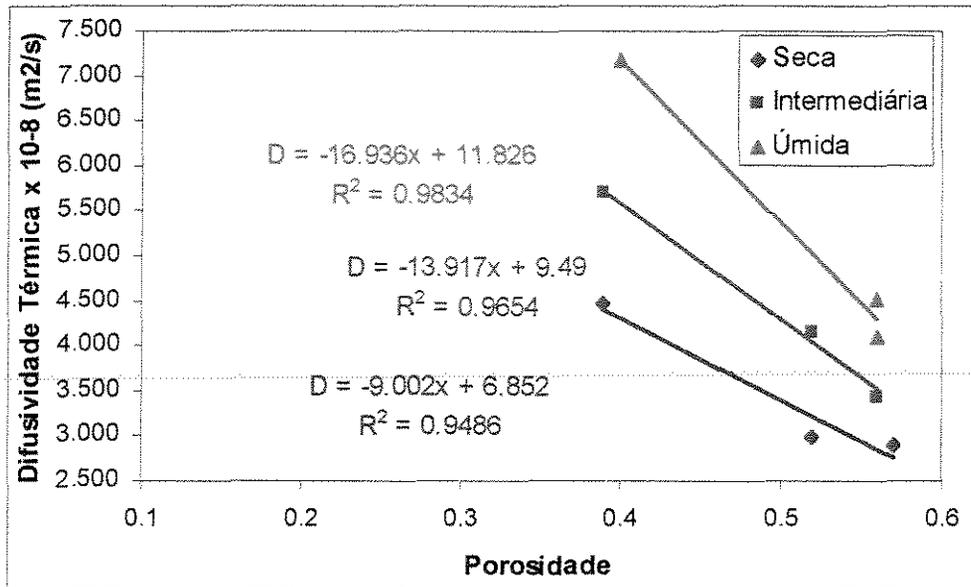


Figura 53: Relação entre os valores de difusividade térmica e a porosidade para o método da sonda.

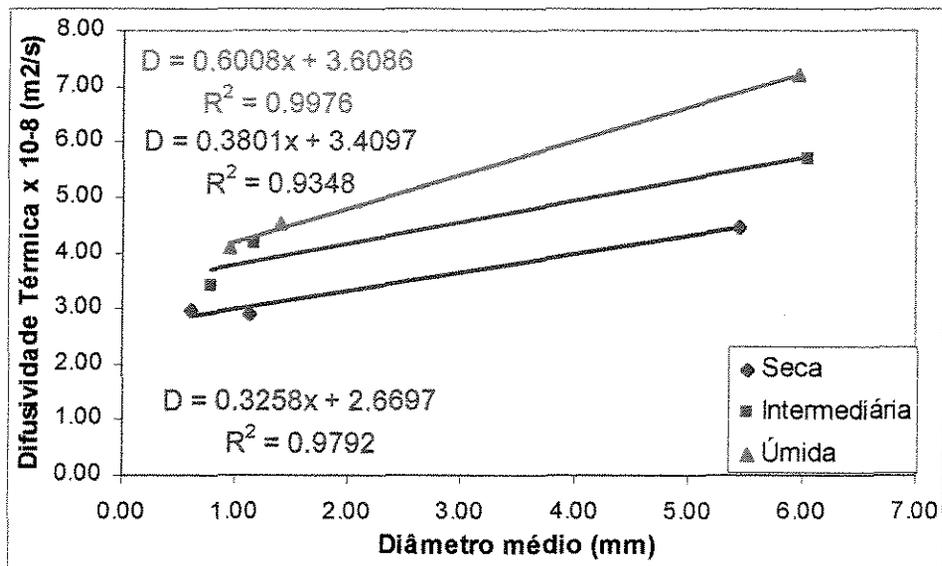


Figura 54: Relação entre os valores de difusividade térmica e o diâmetro médio para o método da sonda.

Conforme pode-se observar pelas figuras (52), (53) e (54), a difusividade é influenciada pela umidade, porosidade e diâmetro médio da partícula de forma semelhante à condutividade térmica. Os valores dos coeficientes das equações resultantes da linearização dos dados são diferentes variam em relação aos valores obtidos para a condutividade térmica, pois no cálculo da difusividade foram utilizados os valores de ρ e C_p de cada material testado.

WATTS e BILANSKI (1973) obtiveram para a soja inteira o valor de difusividade térmica médio de $4,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ($0,00045 \text{ cm}^2/\text{s}$). Portanto, os valores experimentais de difusividade térmica determinados estão dentro da faixa dos valores encontrados em literatura.

5.2.2. MÉTODO DO REGIME ESTACIONÁRIO

Os diferentes materiais testados no equipamento para a determinação das propriedades térmicas pelo método do regime permanente, foram submetidos as condições experimentais apresentadas no quadro (10).

Quadro 10: Condições Experimentais.

Produto	Intervalo de leitura (min)	I (A)	V (V)	UBS (kg/kg)	UBU (kg/kg)
Soja Inteira Seca	10	1	11	0,0854	0,0787
Soja Moída Seca	10	0,5	5,5	0,1072	0,0968
Soja Fubá Seca	10	0,7	5,5	0,1101	0,0992
Soja Inteira Interm.	5	1,0	11	0,1581	0,1365
Soja Moída Interm	5	0,5	5,5	0,1511	0,1312
Soja Fubá Interm.	5	0,5	5,5	0,1577	0,1362
Soja Inteira Úmida	5	1	11	0,2800	0,2186
Soja Moída Úmida	5	1	11	0,2123	0,1751
Soja Fubá Úmida	5	0,5	5,5	0,2332	0,1891

Os dados obtidos experimentalmente para os diferentes materiais testados encontram-se no apêndice em disquete.

Para o cálculo da condutividade térmica pelo regime permanente foram considerados os últimos valores da leitura da temperatura nos termopares como sendo os valores de equilíbrio no experimento. O quadro (11) apresenta o valor da última leitura dos termopares dos experimentos realizados.

Quadro 11: Valores das temperaturas finais utilizadas para os diferentes lotes testados.

Produto	Tempo (min)	Temperatura no termopar (°C)					
		1	2	3	4	5	6
Soja Inteira Seca	1700	93,3	67,7	49,4	40,5	32,7	26,3
Soja Moída Seca	1760	46,6	38	32,1	28,4	26	22,8
Soja Fubá Seca	1390	50,8	40,6	32,7	28,6	25,4	21,8
Soja Inteira Interm.	1295	81,40	63,40	48,29	39,55	35,92	29,91
Soja Moída Interm	1140	53,16	44,95	40,51	36,63	36,56	33,72
Soja Fubá Interm.	1365	50,15	39,96	36,30	31,84	31,37	28,14
Soja Inteira Úmida	2413	56,10	44,93	38,86	33,43	32,37	27,94
Soja Moída Úmida	1750	66,48	53,47	29,29	29,29	29,47	28,85
Soja Fubá Úmida	2263	62,82	52,09	28,70	28,70	29,08	28,26

Pode-se observar que existe uma variação nos valores da última leitura de temperatura entre os experimentos, tal situação se deve a diferentes fatores, entre eles: a diferença física entre os materiais testados, condições ambientais (temperatura ambiente) diversas entre cada experimento, diferença entre as potências elétricas utilizadas.

De acordo com a revisão bibliográfica utilizou-se a equação (98) para o cálculo da condutividade pelo regime permanente.

Os valores da condutividade térmica calculados para os diferentes materiais aparecem nos quadros (12) a (20).

Quadro 12: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Inteira Seca

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,125	0,107	0,107	0,106	0,104
Termopar 2		0,081	0,090	0,092	0,092
Termopar 3			0,110	0,103	0,100
Termopar 4				0,094	0,093
Termopar 5					0,091

Quadro 13: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Moída Seca.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,093	0,081	0,0780	0,079	0,073
Termopar 2		0,063	0,064	0,067	0,062
Termopar 3			0,066	0,070	0,062
Termopar 4				0,076	0,059
Termopar 5					0,048

Quadro 14: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Fubá Seca

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,110	0,091	0,089	0,088	0,084
Termopar 2		0,066	0,072	0,074	0,070
Termopar 3			0,084	0,082	0,074
Termopar 4				0,080	0,068
Termopar 5					0,057

Quadro 15: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Inteira Intermediária.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,178	0,142	0,136	0,141	0,136
Termopar 2		0,099	0,104	0,117	0,113
Termopar 3			0,112	0,139	0,125
Termopar 4				0,202	0,137
Termopar 5					0,097

Quadro 16: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Moída Intermediária.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,098	0,093	0,086	0,096	0,090
Termopar 2		0,084	0,074	0,095	0,084
Termopar 3			0,063	0,109	0,085
Termopar 4					0,113
Termopar 5					0,051

Quadro 17: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Fubá Intermediária.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0.079	0.085	0.077	0.085	0.079
Termopar 2		0.102	0.076	0.093	0.080
Termopar 3			0.055	0.087	0.070
Termopar 4				0.392	0.089
Termopar 5					0.045

Quadro 18: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Inteira Úmida.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,287	0,272	0,250	0,270	0,248
Termopar 2		0,245	0,215	0,255	0,223
Termopar 3			0,181	0,264	0,211
Termopar 4				0,692	0,240
Termopar 5					0,132

Quadro 19: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Moída Úmida.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,074	0,074	0,074	0,076	0,077
Termopar 2		0,073	0,073	0,078	0,080
Termopar 3			0,075	0,083	0,085
Termopar 4				0,099	0,096
Termopar 5					0,091

Quadro 20: Resultados do cálculo da Condutividade Térmica da Soja Fubá Úmida.

Condutividade Térmica W/m °C					
	Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares				
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	0,0747	0,0344	0,0416	0,0475	0,0506
Termopar 2		0,0159	0,0264	0,0348	0,0398
Termopar 3					
Termopar 4					0,7515
Termopar 5					0,1786

Com o intuito de avaliar a precisão do método do regime permanente, os valores da condutividade térmica calculados para os diferentes materiais testados foram comparados aos valores determinados pelo método da sonda, que foi assumido como padrão.

Como o teor de umidade dos materiais foi diferente para os dois métodos, os valores de condutividade térmica para o método da sonda foram calculados com base nos teores de umidade correspondentes ao utilizados no método do regime permanente. Utilizou-se as correlações obtidas entre a condutividade térmica e o teor de umidade em base seca apresentadas na figura (49). O quadro (21) apresenta os valores da umidade em base seca dos materiais testados em regime permanente e os valores de k e D calculados.

Quadro 21: Valores de k e D ajustados pela UBS dos materiais testados em regime permanente.

Produto	UBS (kg/kg) Regime Permanente	Valor de k (W/m°C) da Sonda ajustado a umidade do Reg. Permanente	Valor de D (m ² /s) da Sonda ajustada a umidade do Reg. Permanente
Soja Inteira Seca	0,0854	0,104	4,50E-08
Soja Moída Seca	0,1072	0,073	3,03E-08
Soja Fubá Seca	0,1101	0,071	3,01E-08
Soja Inteira Interm.	0,1581	0,128	5,60E-08
Soja Moída Interm	0,1511	0,086	3,76E-08
Soja Fubá Interm.	0,1577	0,080	3,46E-08
Soja Inteira Úmida	0,28	0,168	7,50E-08
Soja Moída Úmida	0,2131	0,105	4,52E-08
Soja Fubá Úmida	0,2332	0,094	4,05E-08

Calculou-se o erro relativo para cada valor de cada material em relação ao valor determinado pelo método da sonda pela seguinte relação:

$$E = \frac{\text{Valor}_{\text{observado}} - \text{Valor}_{\text{predito}}}{\text{Valor}_{\text{observado}}}, \text{ ou seja } E = \frac{K_{\text{sonda}} - K_{\text{permanente}}}{K_{\text{sonda}}} \quad (102)$$

Foi calculado para cada material a média dos valores absolutos dos erros. Também foi determinado o valor da condutividade térmica de cada material testado que apresentou o menor valor de erro em relação ao valor da condutividade térmica do método da sonda. A tabela com a

posição dos termopares em que cada valor de condutividade térmica foi calculado, os erros de cada valor em relação ao valor encontrado no método da sonda e a média dos valores absolutos dos erros aparecem no quadro (22). Os menores valores de erros para cada material aparecem em negrito.

Quadro 22: Valores dos erros relativos para a condutividade para o método do regime permanente.

Posição	Inteira Seca	Moída Seca	Fubá Seca	Inteira Interm.	Moída Interm.	Fubá Interm.	Inteira Úmida	Moída Úmida	Fubá Úmida
1 e 2	0,20	0,27	0,55	0,39	0,14	0,01	0,71	0,30	0,21
1 e 3	0,03	0,11	0,28	0,11	0,08	0,06	0,62	0,30	0,63
2 e 3	0,22	0,14	0,07	0,23	0,02	0,28	0,46	0,30	0,83
1 e 4	0,03	0,07	0,25	0,06	0,00	0,04	0,49	0,30	0,56
2 e 4	0,13	0,12	0,01	0,19	0,14	0,05	0,28	0,30	0,72
3 e 4	0,06	0,10	0,18	0,13	0,27	0,31	0,08	0,29	
1 e 5	0,02	0,08	0,24	0,10	0,11	0,06	0,61	0,28	0,49
2 e 5	0,12	0,08	0,04	0,09	0,10	0,16	0,52	0,26	0,63
3 e 5	0,01	0,04	0,15	0,09	0,27	0,09	0,57	0,21	
4 e 5	0,10	0,04	0,13	0,58		3,90	3,12	0,06	
1 e 6	0,00	0,00	0,18	0,06	0,05	0,01	0,48	0,27	0,46
2 e 6	0,12	0,15	0,01	0,12	0,02	0,00	0,33	0,24	0,58
3 e 6	0,04	0,15	0,04	0,02	0,01	0,13	0,26	0,19	
4 e 6	0,11	0,19	0,04	0,07	0,31	0,11	0,43	0,09	6,99
5 e 6	0,13	0,34	0,20	0,24	0,41	0,44	0,21	0,13	0,90
Erro Relativ. Médio	0,09	0,13	0,16	0,16	0,14	0,38	0,61	0,23	2,16

Conforme pode ser observado no quadro (22), de uma maneira geral, os materiais com menor teor de umidade (material seco e com umidade intermediária) apresentaram os menores valores de média dos erros absolutos em relação aos materiais úmidos. Isto se deve ao fato de que o cálculo da condutividade térmica, para materiais úmidos pelo método do regime permanente, apresenta alguns problemas, entre eles KAZARIAN e HALL (1965) e FREIRE (1981), citam o

fato de que métodos em regime permanente requererem muito tempo para realizar o experimento, acarretando numa migração de umidade da amostra e conseqüentemente causando erros experimentais, existindo por este motivo dificuldade de aplicação deste método em produtos de alto conteúdo de umidade superior a 10%.

Com base nas citações de literatura consultadas, associado aos resultados e análise apresentados, o equipamento testado, que se utiliza do método do regime permanente para a determinação das propriedades térmicas é recomendável para materiais com baixo conteúdo de umidade. Para tais materiais o método apresentou boa precisão em relação ao método da sonda e os valores encontrados em literatura.

O valor da difusividade térmica para o regime permanente foi calculado pela equação (2) utilizando-se dos valores de condutividade térmica calculados e apresentados nos quadros (12) a (20), da densidade determinada experimentalmente e da capacidade calorífica encontrada na literatura. Os valores calculados de difusividade térmica para os lotes testados são apresentados nos quadros (23) a (31) que seguem abaixo.

Quadro 23: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Inteira Seca.

Difusividade Térmica (m²/s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	5,419E-08	4,630E-08	4,654E-08	4,579E-08	4,519E-08
Termopar 2		3,525E-08	3,934E-08	3,964E-08	3,963E-08
Termopar 3			4,774E-08	4,445E-08	4,310E-08
Termopar 4				4,069E-08	4,019E-08
Termopar 5					3,959E-08

Quadro 24: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Moída Seca.

Difusividade Térmica (m²/s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	3,862E-08	3,356E-08	3,233E-08	3,225E-08	3,046E-08
Termopar 2		2,618E-08	2,669E-08	2,768E-08	2,584E-08
Termopar 3			2,750E-08	2,913E-08	2,563E-08
Termopar 4				3,166E-08	2,440E-08
Termopar 5					1,896E-08

Quadro 25: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Fubá Seca.

Difusividade Térmica (m²/s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	4,663E-08	3,850E-08	3,795E-08	3,745E-08	3,580E-08
Termopar 2		2,800E-08	3,057E-08	3,130E-08	2,992E-08
Termopar 3			3,553E-08	3,486E-08	3,132E-08
Termopar 4				3,400E-08	2,878E-08
Termopar 5					2,413E-08

Quadro 26: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Inteira Intermediária.

Difusividade Térmica (m²/s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	7,788E-08	6,204E-08	5,934E-08	6,166E-08	5,943E-08
Termopar 2		4,317E-08	4,535E-08	5,103E-08	4,952E-08
Termopar 3			4,911E-08	6,063E-08	5,473E-08
Termopar 4				8,839E-08	5,984E-08
Termopar 5					4,261E-08

Quadro 27: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Moída Intermediária.

Difusividade Térmica (m ² /s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	4,266E-08	4,055E-08	3,753E-08	4,220E-08	3,933E-08
Termopar 2		3,665E-08	3,247E-08	4,174E-08	3,690E-08
Termopar 3			2,769E-08	4,748E-08	3,706E-08
Termopar 4				1,106E-06	4,954E-08
Termopar 5					2,256E-08

Quadro 28: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Fubá Intermediária.

Difusividade Térmica (m ² /s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	3,404E-08	3,668E-08	3,355E-08	3,695E-08	3,440E-08
Termopar 2		4,402E-08	3,294E-08	4,039E-08	3,470E-08
Termopar 3			2,383E-08	3,768E-08	3,052E-08
Termopar 4				1,698E-07	3,857E-08
Termopar 5					1,960E-08

Quadro 29: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Inteira Úmida.

Difusividade Térmica (m ² /s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	1,281E-07	1,215E-07	1,118E-07	1,206E-07	1,109E-07
Termopar 2		1,095E-07	9,591E-08	1,139E-07	9,961E-08
Termopar 3			8,069E-08	1,180E-07	9,409E-08
Termopar 4				3,091E-07	1,074E-07
Termopar 5					5,908E-08

Quadro 30: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Moída Úmida.

Difusividade Térmica (m²/s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	3,207E-08	3,182E-08	3,187E-08	3,283E-08	3,329E-08
Termopar 2		3,129E-08	3,162E-08	3,363E-08	3,440E-08
Termopar 3			3,213E-08	3,596E-08	3,677E-08
Termopar 4				4,279E-08	4,120E-08
Termopar 5					3,936E-08

Quadro 31: Resultados do cálculo da Difusividade Térmica da Soja Fubá Úmida.

Difusividade Térmica (m²/s)					
Calculada pelo Diferencial de Temperatura entre os termopares					
Termopar	2	3	4	5	6
Termopar 1	3,218E-08	1,482E-08	1,792E-08	2,046E-08	2,180E-08
Termopar 2		6,861E-09	1,138E-08	1,500E-08	1,713E-08
Termopar 3					
Termopar 4					3,237E-07
Termopar 5					7,695E-08

5.2.3. MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO

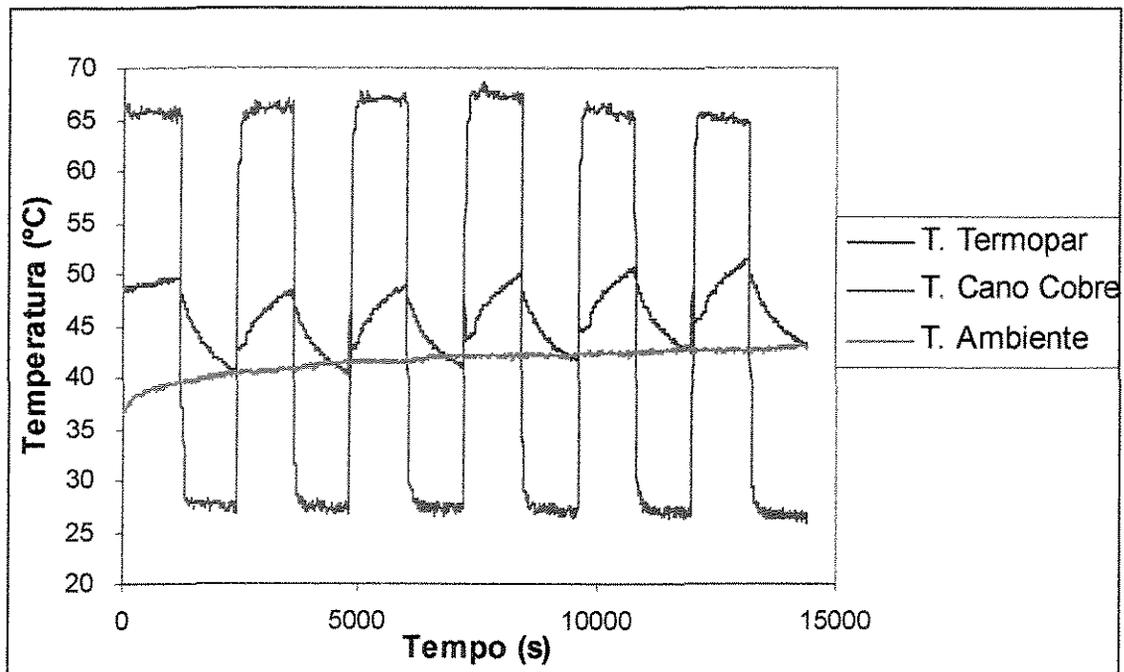
Os dados experimentais dos materiais testados, obtidos no equipamento construído para determinação das propriedades térmicas pelo método do Equilíbrio Dinâmico, foram tratados e encontram-se no apêndice, em disquete.

A seguir no quadro (32) encontram-se os parâmetros utilizados nos experimentos realizados no equipamento do Método do Equilíbrio Dinâmico:

Quadro 32: Dados dos experimentos - Método do Equilíbrio Dinâmico

Produto	Intervalo de leitura (s)	R (mm)	Período (s)	UBU (kg/kg)	UBS (kg/kg)
Soja Inteira Seca	15	0,7	1,200	0,0810	0,0881
Soja Moída Seca	15	0,7	1,200	0,1041	0,1162
Soja Fubá Seca	15	0,7	1,200	0,0982	0,1089
Soja Inteira Interm.	15	0,7	1,200	0,1389	0,1613
Soja Moída Interm	15	0,7	900	0,1312	0,1511
Soja Fubá Interm.	15	0,7	900	0,1362	0,1577
Soja Inteira Úmida	15	0,7	600	0,2102	0,2661
Soja Moída Úmida	15	0,7	900	0,1830	0,2240
Soja Fubá Úmida	15	0,7	1,200	0,1891	0,2332

Os dados da temperatura em função do tempo, do termopar localizado no interior cilindro, da temperatura ambiente e da temperatura do cano de cobre, localizado no centro do cilindro do equipamento, são apresentados nas figuras (55) a (63) que seguem abaixo

**Figura 55: Dados experimentais para a Soja Inteira Seca**

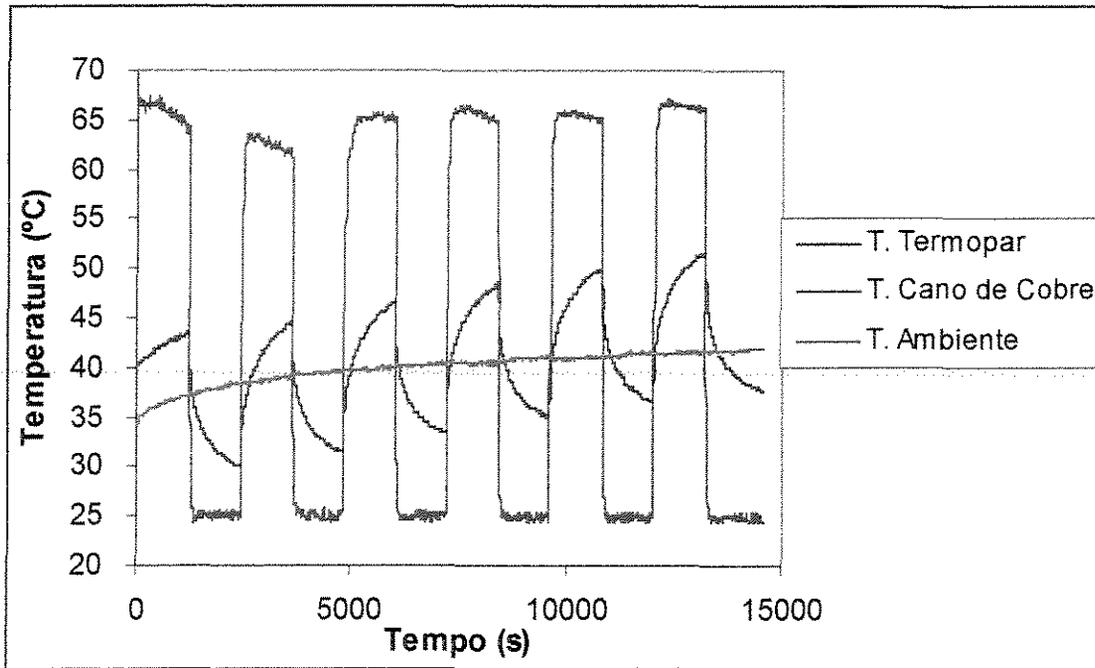


Figura 56: Dados experimentais para a Soja Moída Seca.

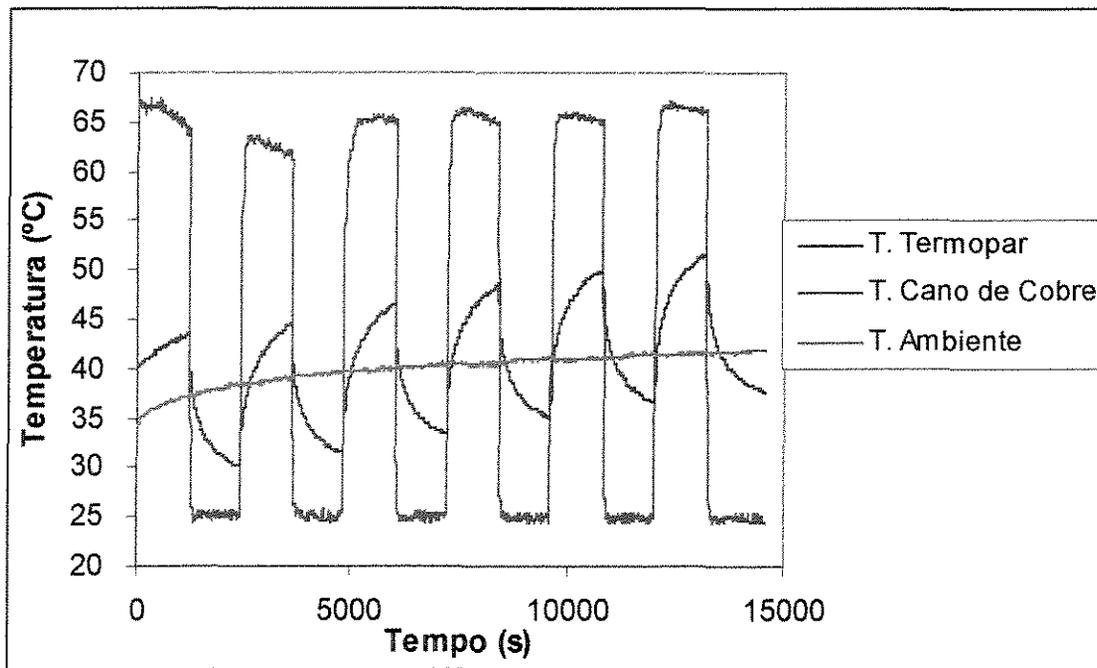


Figura 57: Dados experimentais para a Soja Fubá Seca.

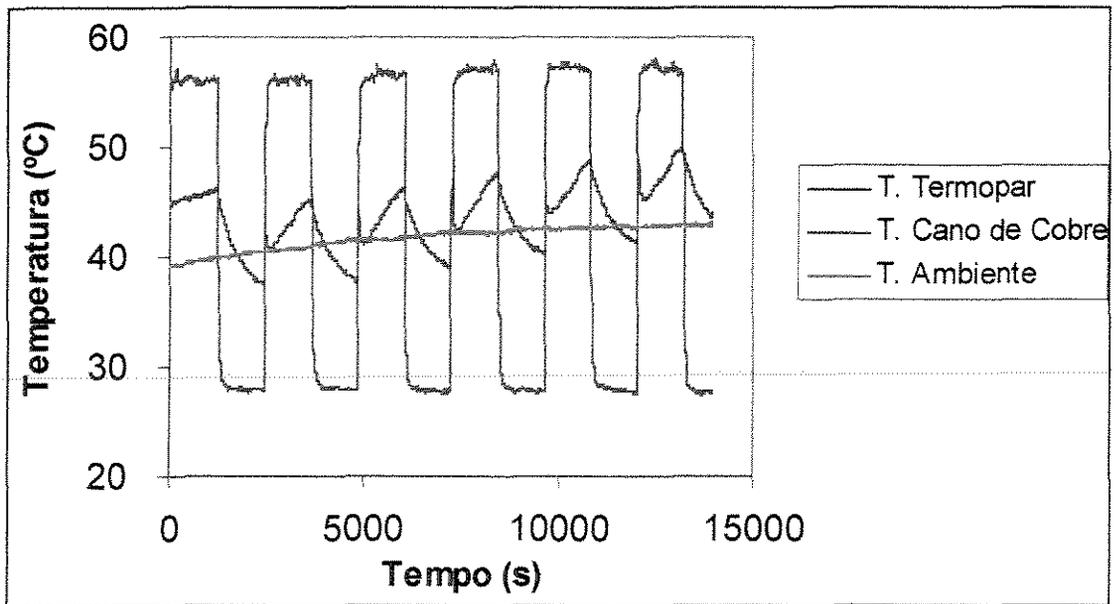


Figura 58: Dados experimentais para a Soja Inteira Intermediária.

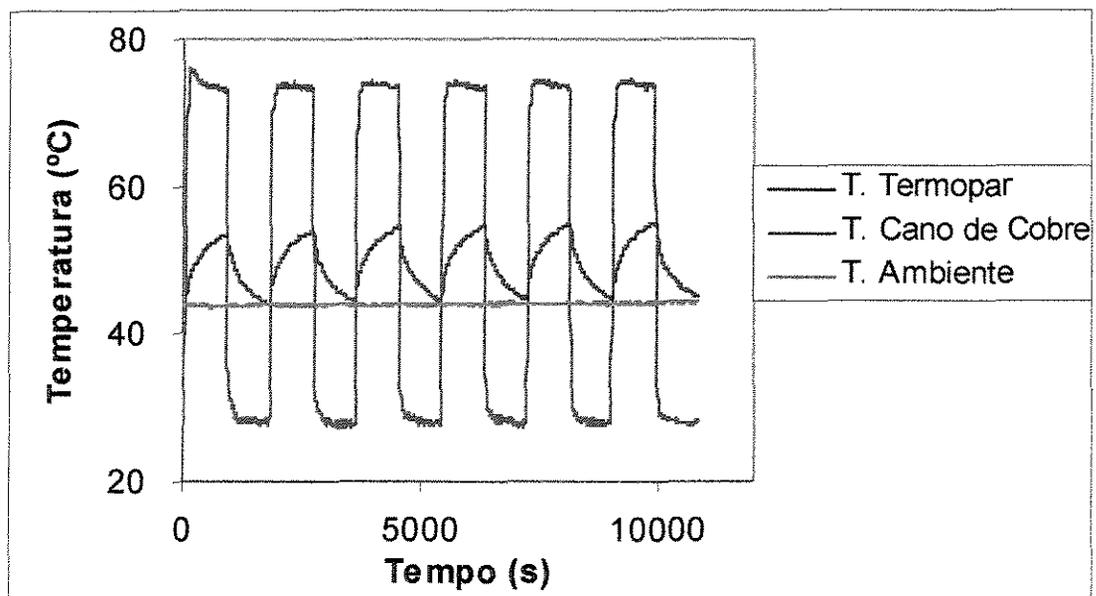


Figura 59: Dados experimentais para a Soja Moída Intermediária.

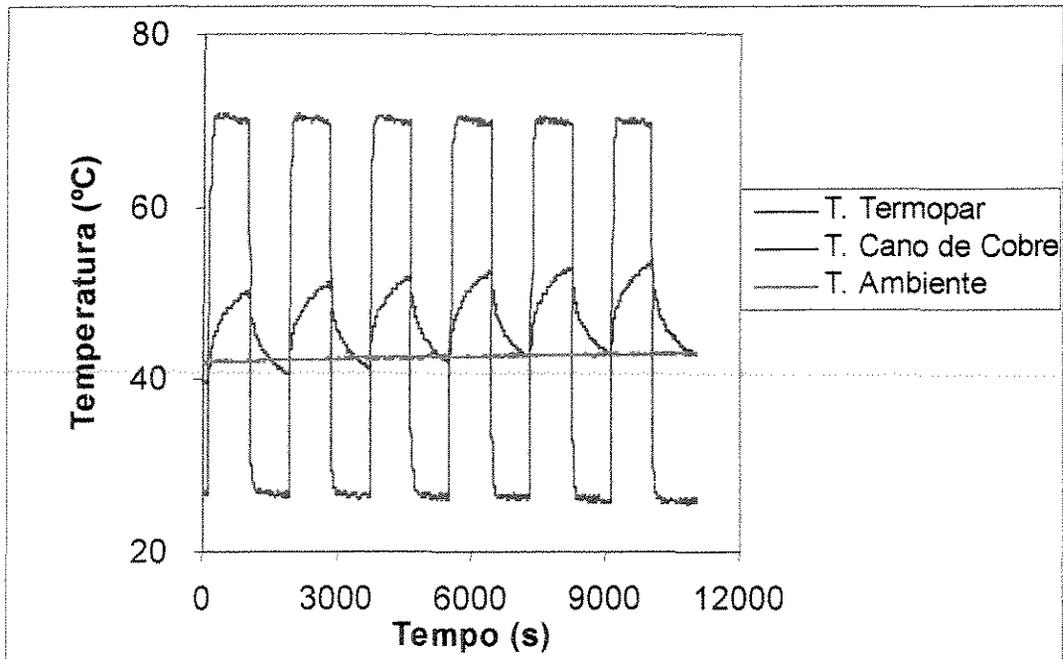


Figura 60: Dados experimentais para a Soja Fubá Intermediária.

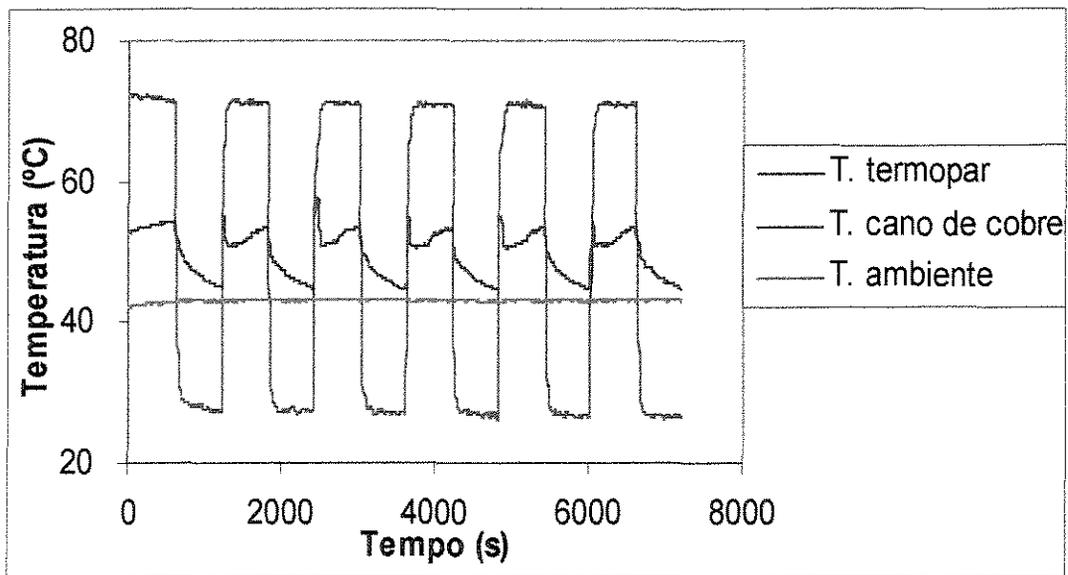


Figura 61: Dados experimentais para a Soja Inteira Úmida.

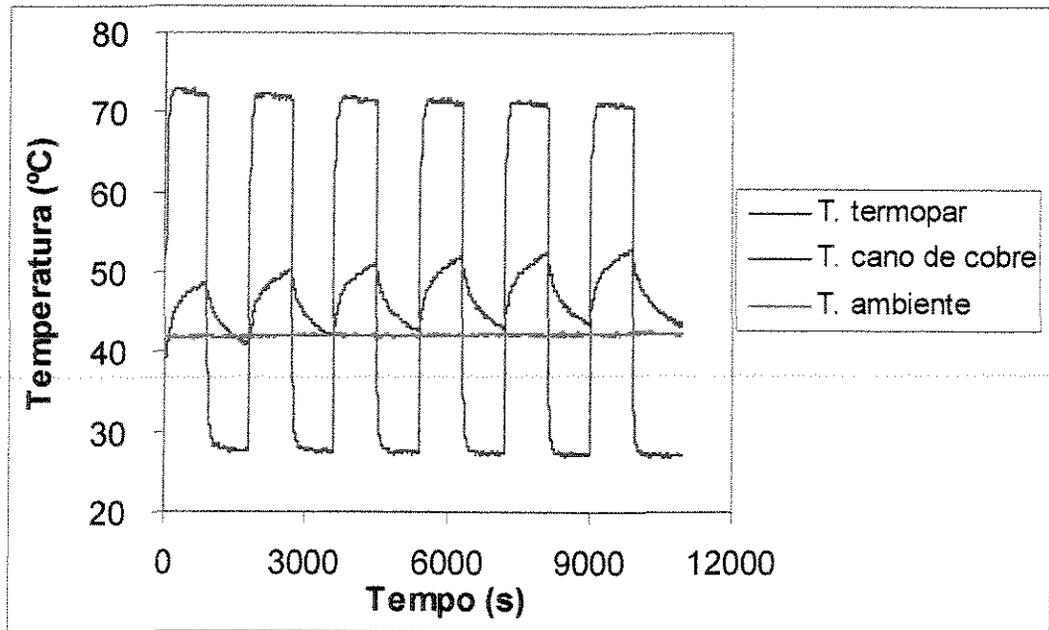


Figura 62: Dados experimentais para a Soja Moída Úmida.

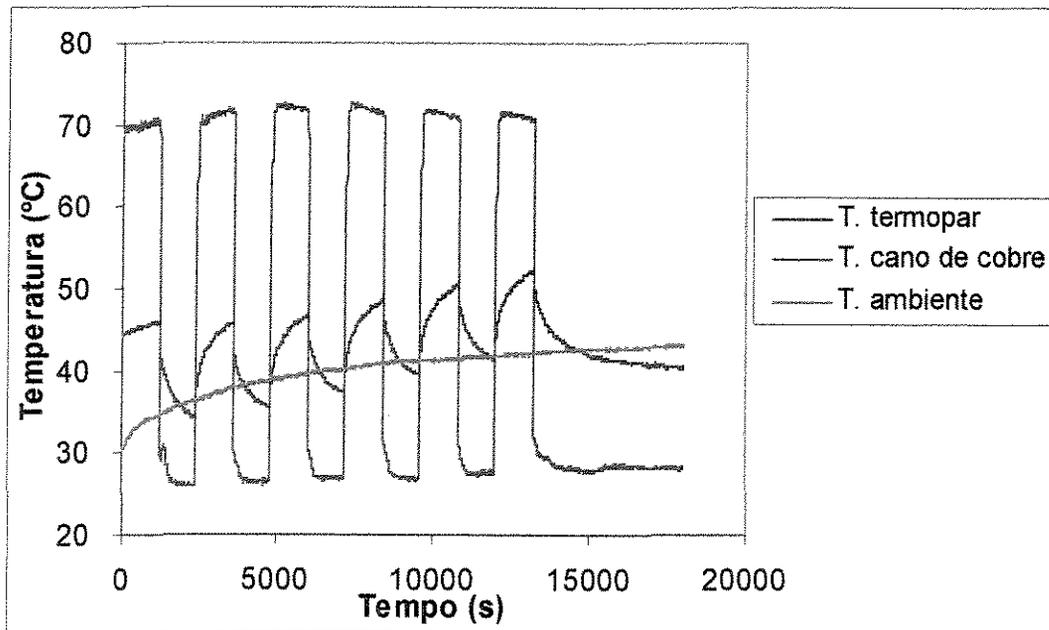


Figura 63: Dados experimentais para a Soja Fubá Úmida.

Os resultados encontrados da Difusividade Térmica (D), Coeficiente de Correlação (R^2) e Erro Absoluto (E), de todos os materiais, pela resolução da equação (102) utilizando o Software Statística (1995) são apresentados no quadro (33).

Quadro 33: Resultados Dos Experimentos – Método do Equilíbrio Dinâmico

Produto	Difusividade Térmica (m^2/s)	Coeficiente de Correlação (R^2)	E (%)
Soja Inteira Seca	4,414E-08	0,975	1,29
Soja Moída Seca	2,991E-08	0,854	3,66
Soja Fubá Seca	3,029E-08	0,936	1,41
Soja Inteira Interm.	5,709E-08	0,951	3,95
Soja Moída Interm	4,024E-08	0,983	1,01
Soja Fubá Interm.	3,485E-08	0,892	2,47
Soja Inteira Úmida	7,214E-08	0,820	2,11
Soja Moída Úmida	4,523E-08	0,933	1,65
Soja Fubá Úmida	4,085E-08	0,609	2,54

Na determinação da Difusividade Térmica pelo software Statística, os valores experimentais do incremento de temperatura foram comparados aos valores preditos pela equação (102), com o intuito de se obter o Coeficiente de Correlação (R^2) e o Erro Absoluto Relativo (E). As figuras (64) a (72) mostram a comparação entre os dados experimentais e os dados calculados pela equação 102. Os resultados completos encontram-se no apêndice.

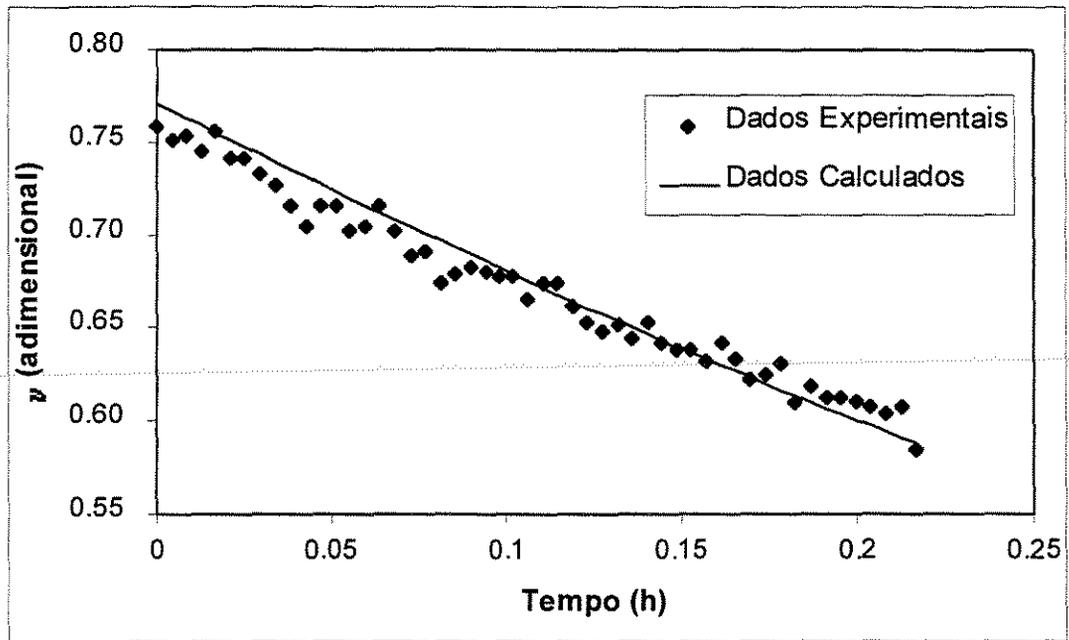


Figura 64: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Inteira Seca.

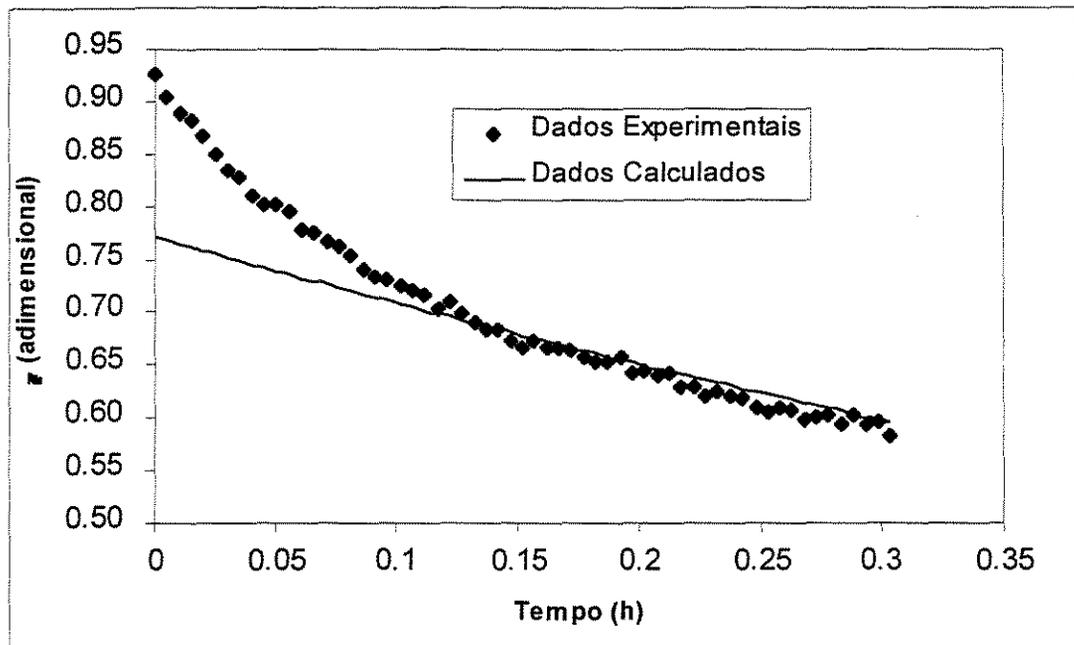


Figura 65: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Moída Seca.

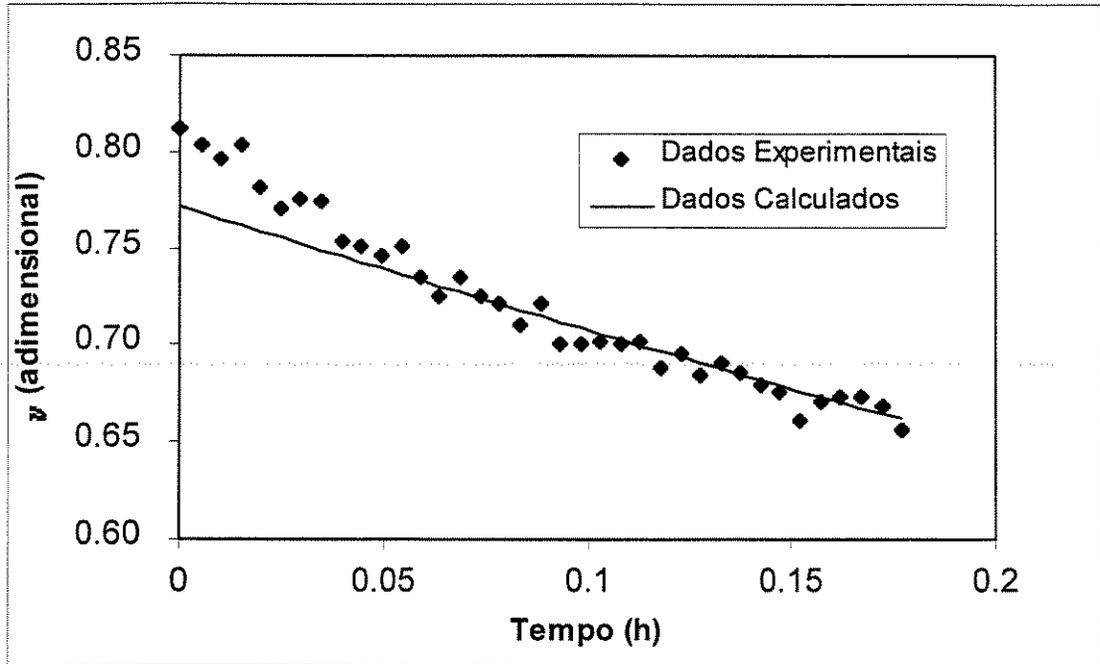


Figura 66: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Fubá Seca.

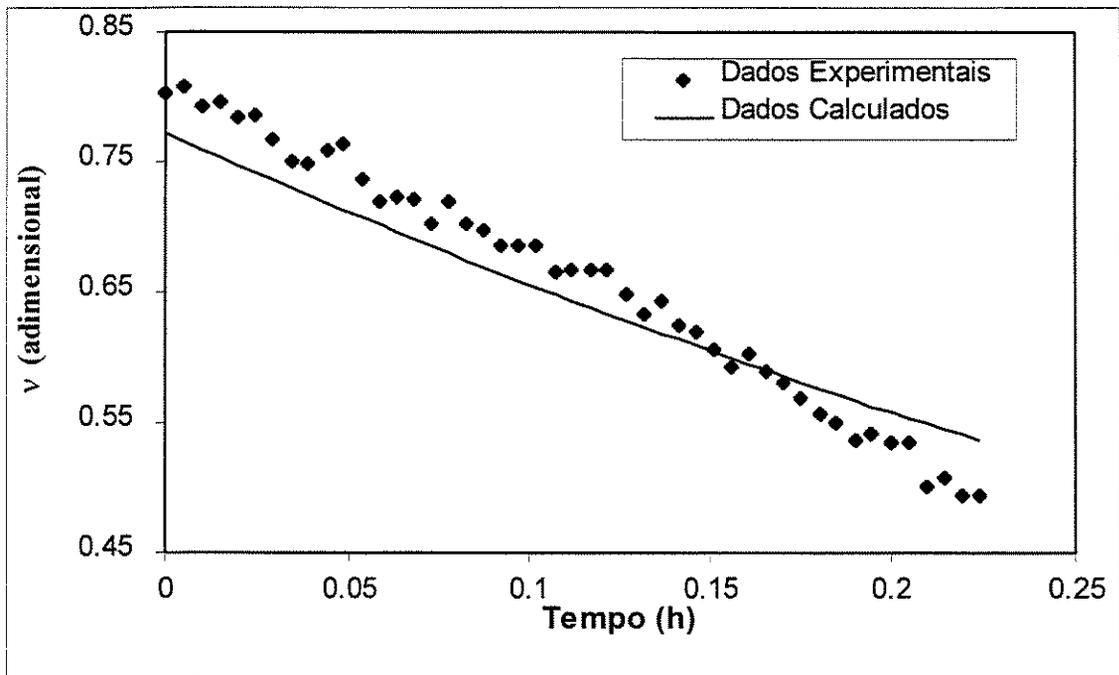


Figura 67: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Inteira Intermediária.

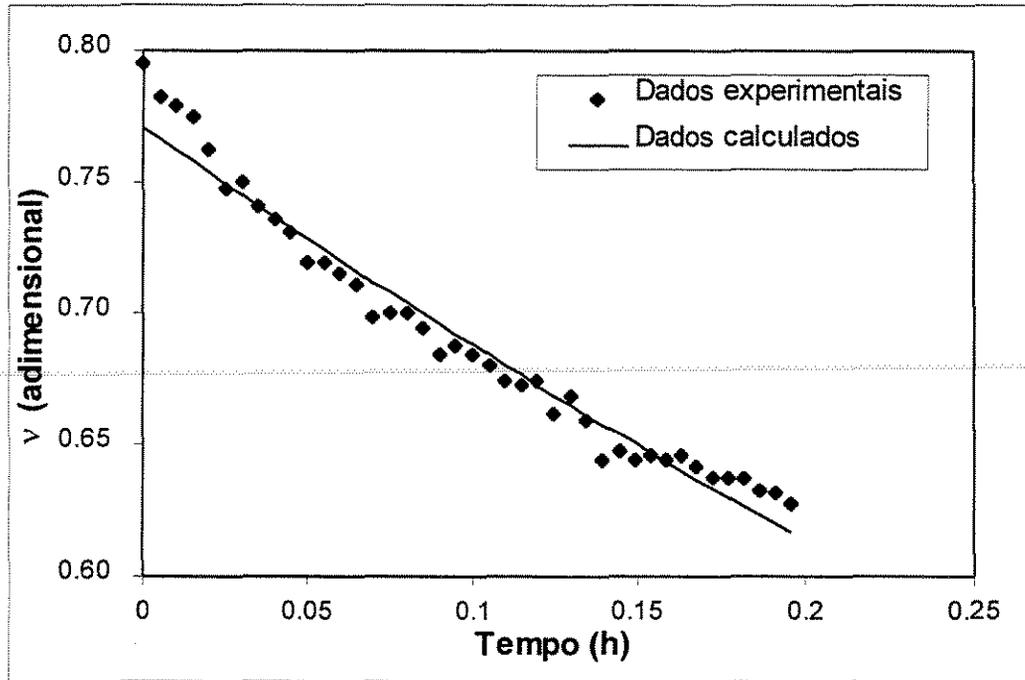


Figura 68: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Moída Intermediária.

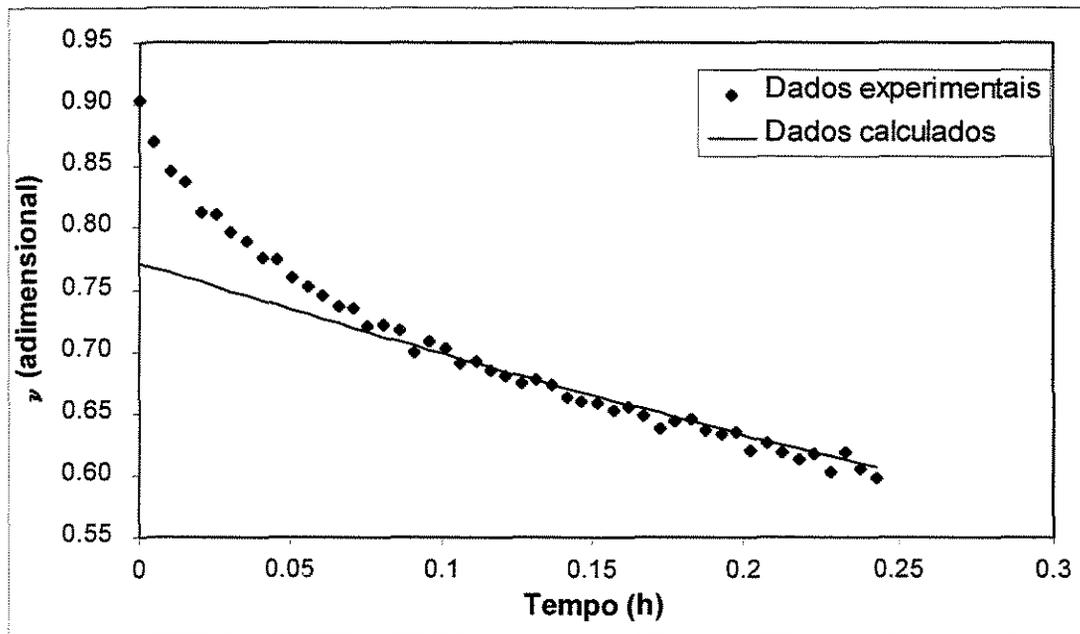


Figura 69: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Fubá Intermediária.

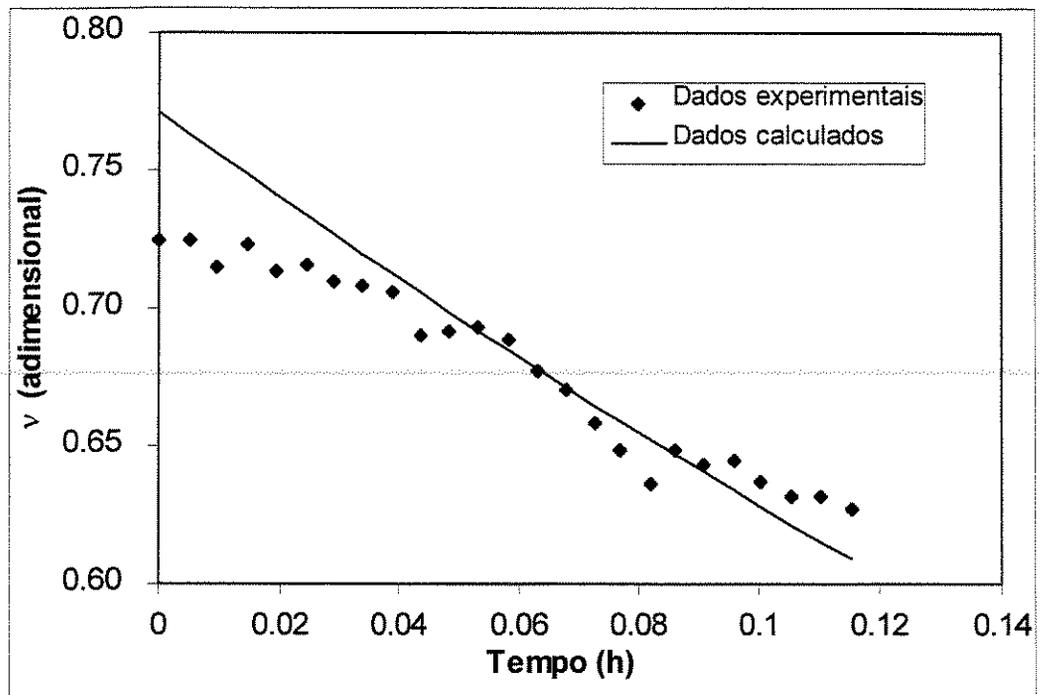


Figura 70: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Inteira Úmida.

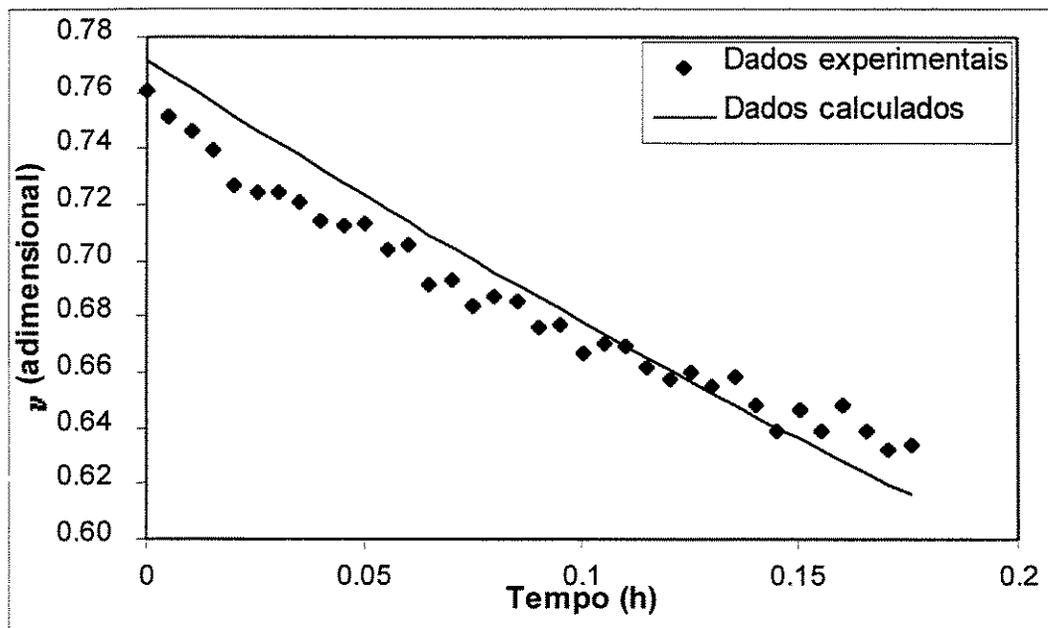


Figura 71: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Moída Úmida.

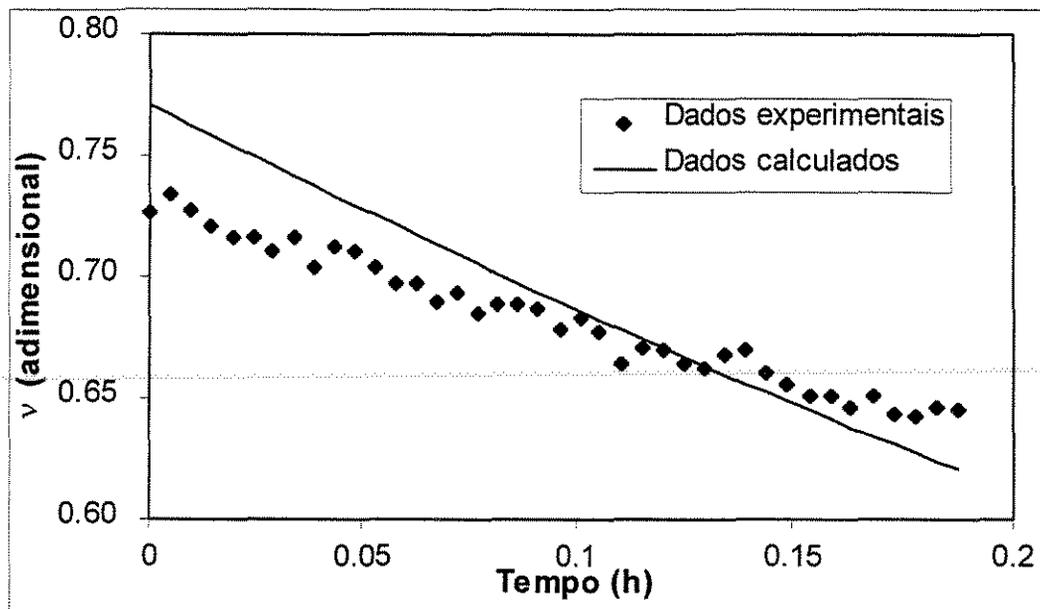


Figura 72: Dados Experimentais comparados com valores preditos para a Soja Fubá Úmida.

Conforme podemos observar pelos resultados da tabela (28) e pelas figuras (64) a (72), os valores dos coeficientes de correlação (R^2) e os valores do erro relativo absoluto (E%) dos dados tratados demonstram um bom ajuste entre os dados observados e os dados preditos pelo modelo utilizado ajustado no Software Estatística (1995).

O valor da Condutividade Térmica foi obtido isolando-se o k da equação (2) e utilizando-se os dados de D , ρ calculados e o valor de C_p encontrado em literatura. Os valores calculados de k se encontram no quadro (34).

Quadro 34: Valores de k calculados

Produto	Difusividade Térmica (m²/s)	Calor Específico (kJ/kg°C)	Densidade Real (Kg/m³)	Condutividad e Térmica (W/m°C)
Soja Inteira Seca	4,414E-08	1970	1173	0,102
Soja Moída Seca	2,991E-08	1970	1225	0,072
Soja Fubá Seca	3,029E-08	1970	1197	0,071
Soja Inteira Interm.	5,709E-08	1970	1160	0,130
Soja Moída Interm	4,024E-08	1970	1161	0,092
Soja Fubá Interm.	3,485E-08	1970	1172	0,081
Soja Inteira Úmida	7,214E-08	1970	1137	0,162
Soja Moída Úmida	4,523E-08	1970	1178	0,105
Soja Fubá Úmida	4,085E-08	1970	1178	0,095

Os resultados da difusividade térmica obtidos foram comparados com os resultados determinados pelo método da sonda, com o intuito de se avaliar a precisão do método. O quadro (35) mostra os resultados do componente transiente do método do equilíbrio dinâmico em comparação aos valores do método da sonda, apresentando o valor dos erros relativos para cada material e a média dos erros relativos.

O valor do erro relativo foi calculado pela equação a seguir:

$$E = \left| \frac{\text{Valor}_{\text{observado}} - \text{Valor}_{\text{predito}}}{\text{Valor}_{\text{observado}}} \right|, \text{ ou seja; } E = \left| \frac{D_{\text{sonda}} - D_{\text{equilibriodinâmico}}}{D_{\text{sonda}}} \right| \quad (103)$$

Quadro 35: Valor dos erros relativos para D.

D (m ² /s)	Erro Relativo
4,41E-08	0,01
2,99E-08	0,03
3,03E-08	0,01
5,71E-08	0,00
4,02E-08	0,03
3,49E-08	0,02
7,21E-08	0,00
4,52E-08	0,00
4,09E-08	0,00
Média Erro Relativo	0,012

Os resultados determinados pelo componente transiente do método do equilíbrio dinâmico são muito semelhantes aos obtidos pelo método da sonda para todos os materiais testados.

O equipamento construído demonstrou um bom potencial para a determinação das propriedades térmicas de grãos úmidos, entretanto, é necessário, um maior número de estudos para se desenvolver uma solução matemática para a determinação das propriedades térmicas que abranja o maior número de condições experimentais que o equipamento fornece, tais como controle da temperatura externa do cilindro, alternância controlada de temperatura no interior do cilindro, controle e regulagem automático do período de alternância de temperatura, registro das temperaturas no sentido radial e longitudinal com diferentes raios.

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS

A comparação dos valores dos resultados das constantes térmicas dos diferentes materiais pelos três métodos utilizados se encontram-se no quadro (36) e (37). No quadro (36) encontram-se os valores de k determinados pelo método do regime permanente que apresentaram o menor valor de erro relativo.

Quadro 36: Comparação dos resultados da condutividade térmica entre os métodos testados.

Material	Sonda k(W/m°C)	Equilíbrio Dinâmico k(W/m°C)	E	Sonda k(W/m°C)	Regime Permanente k(W/m°C)	E.
Soja Inteira Seca	0,103	0,102	0,01	0,104	0,104	0
Soja Moída Seca	0,07	0,072	0,03	0,073	0,073	0
Soja Fubá Seco	0,072	0,071	0,01	0,071	0,072	0,01
Soja Inteira Interm.	0,13	0,130	0,00	0,128	0,125	0,02
Soja Moída Interm.	0,095	0,092	0,03	0,086	0,086	0
Soja Fubá Interm.	0,079	0,080	0,02	0,08	0,08	0
Soja Inteira Úmida	0,161	0,161	0,00	0,168	0,181	0,08
Soja Moída Úmida	0,105	0,105	0,00	0,105	0,099	0,06
Soja Fubá Úmida	0,095	0,095	0,00	0,094	0,074	0,21
Média dos Erros relativos			0,01			0,05

O quadro (37) encontram-se os valores de D obtidos pelo métodos da sonda, calculados pelo método do equilíbrio dinâmico e os valores de D do método do regime permanente que apresentaram o menor valor de erro relativo.

Quadro 37: Comparação dos resultados da difusividade térmica entre os métodos testados.

Material	Sonda D(m ² /s)	Equilíbrio Dinâmico D(m ² /s)	E	Sonda Corrigida para UBS D(m ² /s)	Regime Permanente D(m ² /s)	E
Soja Inteira Seca	4,46E-08	4,41E-08	0,01	4,50E-08	4,52E-08	0,00
Soja Moída Seca	2,9E-08	2,99E-08	0,03	3,03E-08	3,05E-08	0,01
Soja Fubá Seco	2,98E-08	3,03E-08	0,01	3,01E-08	2,99E-08	0,01
Soja Inteira Interm.	5,69E-08	5,71E-08	0,00	5,60E-08	5,47E-08	0,02
Soja Moída Interm.	4,15E-08	4,02E-08	0,03	3,76E-08	3,75E-08	0,00
Soja Fubá Interm.	3,42E-08	3,49E-08	0,02	3,46E-08	3,47E-08	0,00
Soja Inteira Úmida	7,19E-08	7,21E-08	0,00	7,50E-08	8,07E-08	0,08
Soja Moída Úmida	4,52E-08	4,52E-08	0,00	4,52E-08	4,28E-08	0,05
Soja Fubá Úmida	4,09E-08	4,09E-08	0,00	4,05E-08	3,22E-08	0,20
Média dos erros relativos			0,01			0,04

Conforme pode-se observar os resultados do método do regime permanente apresentam a maior média dos erros relativos em comparação com os resultados do método do equilíbrio dinâmico, ou seja, mesmo selecionando-se os valores que tiveram menor erro relativo, o método do regime permanente apresentou uma variação maior dos seus resultados do que o método do equilíbrio dinâmico.

Em relação aos erros relativos de cada valor, pode-se observar que os maiores erros relativos para o método do regime permanente aparecem de uma maneira geral nos materiais com maior teor de umidade (material com umidade intermediária e material úmido), revelando que este método apresenta problemas quando utilizado para materiais úmidos, como já citado anteriormente. Para materiais secos, o método do regime permanente apresentou boa precisão em relação ao método da sonda, sendo portanto recomendável para a determinação das constantes térmicas deste tipo de material

Os valores dos erros relativos para os resultados do método do equilíbrio dinâmico, revelam uma boa precisão do método em relação ao método da sonda, para todos os materiais testados.

5.4. RESULTADOS FINAIS

Os valores das propriedades físicas determinadas para os diferentes materiais testados de encontram no quadro (38).

Quadro 38: Resultados das Propriedades Físicas

Produto	Diâmetro Médio (mm)	Densidade Real (g/cm ³)	Dens. Aparente (g/cm ³)	Porosidade ϵ
Soja Inteira	5,83	1,137-1,173	0,826-0,853	0,39-0,49
Soja Moída	1,22	1,161-1,225	0,655-0,691	0,52-0,57
Soja Fubá	0,77	1,172-1,197	0,655-0,712	0,52-0,56

A faixa de teor de umidade em base úmida para os diferentes materiais testados encontra-se no quadro (39).

Quadro 39: Resultados dos Teores de Umidade

Produto	Umidade Base Úmida (kg/kg)
Soja Seca	0,079-0,104
Soja Intermediária	0,131-0,139
Soja Úmida	0,175-0,219

Os valores de difusividade e condutividade térmica determinados pelo método da sonda calibrada (fonte linear de calor), estiveram dentro da faixa dos valores encontrados em literatura, mostrando boa exatidão na determinação das constantes térmicas dos materiais testados, sendo, portanto este método adotado como referência a título de comparação com os outros métodos.

Os resultados para o método da sonda encontrados para a condutividade e difusividade térmica para os materiais testados encontram-se no quadro (40).

Quadro 40: Resultados das Constantes Térmicas para o Método da Sonda

Produto	k (W/m°C)	D (m ² /s)
Soja Seca	0,070-0,103	2,90-4,46 x 10 ⁻⁸
Soja Intermediária	0,079-0,130	3,42-5,69 x 10 ⁻⁸
Soja Úmida	0,095-0,161	4,09-7,19 x 10 ⁻⁸

Para o método do regime permanente os valores determinados da condutividade e difusividade térmica quando comparados com os valores do método da sonda, apresentaram boa precisão para os materiais secos. Para os materiais com maior teor de umidade os valores determinados apresentaram erros relativos elevados, confirmando os trabalhos revistos que relatam que este método não é recomendável para a determinação das propriedades térmicas de grãos com alto teor de umidade.

Para o método do equilíbrio dinâmico, os resultados encontrados de condutividade e difusividade térmica apresentaram boa precisão quando comparados com os valores do método da sonda para todos os materiais testados. A solução transiente utilizada para a resolução dos dados obtidos pelo equipamento se mostrou adequada, revelando, portanto que o método utilizado é adequado para a determinação das propriedades de grãos secos e úmidos.

Os valores da condutividade e difusividade térmica determinados pelos três métodos apresentaram um incremento com o incremento do conteúdo de umidade dos materiais testados. Isto se deve ao efeito da água que tem um valor de condutividade ou difusividade térmica alto, contribuindo para o aumento da condutividade ou difusividade térmica dos materiais mais úmidos.

Os valores da condutividade ou difusividade térmica determinados pelos três métodos apresentaram uma diminuição com o aumento da porosidade dos materiais testados. Isto se deve ao fato de quanto maior a porosidade maior a quantidade de ar dentro do material. Tendo o ar uma baixa condutividade e difusividade térmica, este contribui para a diminuição da condutividade ou difusividade térmica dos materiais com alta porosidade.

Os valores da condutividade e difusividade térmica determinados pelos três métodos apresentaram um incremento com o incremento do diâmetro médio dos materiais testados. Isto se deve ao fato de que quanto maior o diâmetro médio do material menor é a sua porosidade.

VI. CONCLUSÕES

Baseado no que foi anteriormente exposto pode-se extrair as seguintes conclusões:

1. Os valores de difusividade e condutividade térmica são influenciados pelo teor de umidade , diâmetro médio da partícula e porosidade da soja;
2. O método da sonda gerou resultados condizentes com os encontrados em literatura;
3. O método do regime permanente apresentou bons resultados para o material seco e grande variação para materiais com alto teor de umidade quando comparados com o método da sonda e com dados mostrados em literatura;
4. A componente transiente do equilíbrio dinâmico gerou dados semelhantes aos do método da sonda;
5. O equipamento desenvolvido e construído apresentou facilidade na condução dos experimentos, tanto em relação a calibração das condições experimentais desejadas, como em relação a obtenção dos dados experimentais. Ficando evidente que o método do equilíbrio dinâmico pode ser aplicado à proposta de JACKSON e KIRKHAN (1958), no sentido de obter as constantes térmicas de grãos úmidos.

VII. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há necessidade de se estudar as demais condições matemáticas dispostas na literatura, passíveis de serem geradas pelo equipamento desenvolvido.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ASAE STANDARD, American Society of Agriculture Engineers, **Moisture Measurement- Unground Grain and Seeds**, p.387, 1990.
- BABBIT, J.D. The thermal properties of wheat in bulk. **Canadian Journal of Research**, v. 23, sec.F, 1945.
-
- BENEDETTI, B., C. **Influência do Teor de Umidade sobre as Propriedades Físicas**, Campinas, 1987. 125p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1987.
- BHUMBLA, V.K., SINGH, Y. Resistance Model of Predict Thermal Conductivity of Bulk Grain. **Transactions of the ASAE**, 1993.
- BILSKIE, J. R., HRTON, R. BRISTOW, K L. Test of a Dual-probe Heat-pulse Method for Determining Thermal Properties of Porous Materials. **Soil Science**, U.S.A, v. 163, n. 5, p. 346-355, 1998.
- CARSLAW, H., S., JAEGER, J. C. **Conduction of Heat in Solids**. 2.ed. Oxford University Press, 1959. 496p.
- CHANDRA, S., MUIR, W. E. Thermal Conductivity of Spring Wheat at Low Temperatures. **Transactions of the ASAE**, 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**, v. 29, n. 5, p. 1446-1450, 1986.
- CHAPMAN, A. J. **Heat Transfer**. USA: The Maximilian Company, 1967. 2a. ed.
- CHOI, Y., OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. LEMAUGUER, M.; JELEN, M. **Food Engineering and Process Applications**. Elsevier Applied Science Publishers. p. 93-101, 1986.
- CONAB. Capturado em 03 de março de 2000. Disponível na Internet <http://www.conab.gov.br>.
- DAL FABBRO, I. M., NUNES, A. S. **Thermal Behavior of Moist Soil**, Unpublished paper. 1999.

- DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, v.52, p. 880-886, 1965.
- DONG, Y., TAGAVI, K. A., WU, T. W. e CHOW, L. C. Numerical Modeling of Void Migration in Solids Due to Temperature Gradient Using the Boundary Element Method. **Numerical Heat Transfer Part A-Applications**, v.30, n.4, p365-378, set 1996.
- DUTTA, S.K., NEMA, V.K., BHARDWAJ, R.K. Thermal Properties of gram. **The British Society of Research in Agricultural Engineering**, n. 39, p. 269-275, 1988.
- FASINA, O., SOKHANSANJ, S. Estimation of Moisture Diffusivity Coefficient and Thermal Properties of Alfalfa Pellets. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, p. 333-344, 1996.
- FREIRE, E.S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. Cranfield, 1981. 122 p. M. Sc. Thesis- Cranfield Institute of Technology, National College of Agricultural Engineering, 1981.
- GOEDEKEN, D. L., SHAH, K. K., TONG, C. H. True Thermal Conductivity Determination of Moist Porous Food Materials at Elevated Temperatures. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 6, p. 1062-1066, 1998.
- GUBULIN, J. C., FREIRE, J. T., **Laboratório Didático . Tópicos Especiais em Fenômenos de Transporte**. São Carlos, UFSCar: José Carlos Gubuline e José Teixeira Freire ed. 1990. 165p.
- GUO, C., MALKIN, S. Analysis of Transient Temperatures in Grinding. **Journal of Engineering for Industry**, v. 117, p. 571-577, nov, 1995.
- HAYAKAWA, K.; SUCCAR, J. A method for determining the apparent thermal diffusivity of spherical foods. In: **Lebensm. Wiss. u. Tech.** v.16, p. 373-375, 1983.
- HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil Ltda., 1983.
- INGERSOLL, L. R., ZOBEL, O. J., INGERSOLL, A. C. **Heat Conduction With Engineering, Geological and Other Applications**. New York.: Mc Graw-Hill Book Company. 1954. p. 143-147.
- JACKSON, R. D. **Determination of Thermal Diffusivity of Moist Soil**. Iowa, 1957, Master

- Thesis. Iowa State College, 1957.
- JACKSON, R. D., KIRKHAM, P. Method of Measure of the Real Thermal Diffusivity of Moist Soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 22, n. 6, nov-dez, 1958.
- JASANSKY, A, BILANSKI, W. K. Thermal Conductivity of Whole and Ground Soybeans. **Transaction of the ASAE**, v.16, n. 1, 100-103. 1973.
- JIANG, S., JOFRIET, J.C., MITTAL, G.S. Thermal properties of hayalage **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 02, p. 601-606, 1986.
- KAZARIAN, E. A., HALL, C.W. Thermal properties of grain. **Transactions of the ASAE**, v. 8, n. 01, p. 33-48, 1965.
- KLUITENBERG, G. J., BRISTOW, K.,L., DAS, B. S. Error Analysis of Heat Pulse Method for Measuring Soil Heat Capacity, Diffusivity and Conductivity. **Soil Science Society of America**, v. 59, mai-jun, 1995.
- KONG, J., Y., YANO, T., KIM, J.,D., et. al Prediction of Effective Thermal Diffusivity of Fish and Meats. **Bioscience and Biotechnology and Biochemistry**, v. 58, n. 11, p. 1942-1946, 1994.
- KOSTAROPOULOS, A. E., SARAVACOS, G. D. Thermal Diffusivity of Granular and Porous Foods at Low Moisture Content. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 33, p. 101-109, 1997.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1969, 534 p.
- KUSTERMAN, M., SCHERER, R., KUTZBACH, H. D. Thermal Conductivity and Diffusivity of Shelled Corn and Grain. **Journal of Food Process Engineering**. Connecticut, v. 4, 137-153, 1981.
- MAGEE, T. R. A., BRANSBURG, T., Measurement of Thermal Diffusivity of Potato, Malt Bread and Wheat Flour. **Journal of Food Engineering**, v. 25, 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**

- Technology**, v. 31, n. 5, p. 395-399, 1994.
- MOHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon e Breach science Publishers. 1980. 407 p.
- MOOTE, I. The effect of moisture on the thermal properties of wheat. In: **Canadian Journal of Technology**, n. 31, p. 53-69, 1953.
- MUIR, W.E., VIRAVANICHAI, S. Specific Heat of Wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 17, p. 338-342, 1972.
- MURAKAMI, E. G., SWEAT, V. E., SASTRY, S. K. Recommended Design Parameters for Thermal Conductivity Probes for Nonfrozen Food Materials. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 27, p. 109-123, 1996.
- 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**, v. 25, n. 3, p. 407-416, abril, 1998. Obtido via base de dados Copendex, Internet, dez 1999.
- NIX, G. H., LOWERY, G. W., VACHON, R. I.; TANGER, G.E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line source technique. **Progress in Aeronautics and Astronautics; Thermophysic of Spacecraft and Planetary Bodies**. New York: Academic Press. p.865-878. 1967.
- NUNES, A. S., PARK, K.J., DAL FABBRO, I. M. Construção de um Equipamento para a Determinação das Propriedades Térmicas de Grãos de Soja pelo Método do Equilíbrio Dinâmico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 28, 1999, Pelotas, Anais.
- OTTA, M. O., PARK, K. J. **Construção do sistema de medição da difusividade térmica**. Campinas, 1998. Trabalho (Iniciação Científica)- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- OTTEN, L. Determination of heat transfer using frequency response analysis. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 16, n. 2, p. 103-106, 1974.

- OXLEY, T.A. The properties of grain in bulk. III. The thermal conductivity of meat, maize and oats. **Society of Chemical Industries Transactions**, v. 63, n. 53, p.53-55, 1994.
- ÖZISIK, M. N. **Boundary Value Problems of Heat Conduction**. USA: International Textbook Company, 1968. 505 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, maio-ago, 1999.
- PARK, K. J., MURR, F. E. X., SALVADEGO, M. Construção de um Sistema de Medição da Condutividade Térmica pelo Método da Sonda. **Ciência e Tecnologia Alimentícia**, v 17, n. 1, p. 7-10, jan-abr. 1997a.
- PARK, K. J., MURR, F. E. X., SALVADEGO, M. Medição da Condutividade Térmica de Milho Triturado pelo Método da Sonda. In: **Ciência e Tecnologia Alimentícia**, v. 17, n. 3, p.242-247, set-dez.1997b.
- QUASHOU, M., NIX,G.H., VACHON, R. I., LOWERY, G. W. Thermal conductivity values for ground beef and chuck. **Food Technol**, v. 24. p. 493-96, 1970.
- RABIN, Y, SHITZER, A., Exact Solution to the One-Dimensional Inverse-Stefan Problem in Nonideal Biological Tissues. **Journal of Heat Transfer**, v. 117, p. 425-431, mai, 1995.
- RAO, M. O., BARNARD, J., KENNY, J.F. Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes. **Transaction of the ASAE**, v. 16, n. 1, 114-117, 1973.
- RAHMAN, M. S., CHEN, X. D., PERERA, C. O. An Improved Thermal Conductivity Prediction Model for Fruits and Vegetables as a Function of Temperature, Water Content and Porosity. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 31, p. 163-170, 1997.
- ROSSI, S. J. **Ar Natural e Bomba de Calor na Secagem e armazenamento de Sementes de Soja**. Campinas, 1980. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos e Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, 1980.
- SAKIYAMA, T., YANO, T. Temperature Dependence of the Effective Thermal Conductivity of

Food Gels Impregnated with air Bubbles. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, Japão, v. 27, n. 3, p.291-295, 1994.

SCHMALKO, M. E., MORAWICKI, R. O., RAMLLO, L. A., Simultaneous, determination of specific heat capacity and thermal conductivity using the finite-difference method. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 531-540, 1997. Obtido via base de dados Agrícola, CD-ROM. Dez 1999

SHARMA, D.K., THOMPSON, T.L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 1, p. 114-117, 1973.

SHYAMAL, D. K., CHAKRAVERTY, A., BANERJEE, H. D. Thermal Properties of Raw, Parboiled and Debranned Parboiled Wheat and Wheat Bulgur. **Energy Conversion and Management**, v. 35, n. 9, p. 801-804, 1994.

SISSON, L. E., PITTS, D. R. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois S. A. 1979. 765 p.

SUTTER, D. A., AGRAVAL, K. K., CLARY, B. L. Thermal Properties of Peanut Pods, Hulls and Kernels. **Transaction of the ASAE**, v. 18, n. 2, p. 370-375, 1972.

STATISTICA FOR WINDOWS 5.0. **Computer program manual**. Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 1995.

SWEAT, V. E. Experimental Values of Thermal Conductivity Probe for Small Food Samples. **Transaction of the ASAE**, v. 17, p. 56-58, 1974.

TAVMAN, S., TAVMAN, I. H., EVCIN, S. Measurement of Effective Thermal Conductivity of Wheat as a Function of Moisture Content. **International Communicator in Heat and Mass Transfer, USA**, v.25, n. 5, p. 733-741, 1998.

TAVMAN, S., TAVMAN, I. H. Measurement of Thermal Diffusivity of granular Food Materials. **International Communicator in Heat and Mass Transfer, USA**, v.24, n. 7, p. 945-953, 1997.

TERESO, M. J. A. **Modelo de Elementos Finitos para a Simulação Matemática do Perfil Térmico de Solos Agrícolas**. Campinas, 1983. Tese (Mestrado Engenharia Agrícola)-

- Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1983.
- TIE, R. P. **Thermal Conductivity**. USA: Academic Press Inc. 1969.
- TIMBERS, G.E. Properties of rape-seed. 1. Thermal conductivity and specific heat. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 17, n. 2, p. 81-84, 1975.
- VIEIRA, J. A. G., GASPARETTO, C.A. Propriedades físicas do suco de laranja. In: **XXIV. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais**. Viçosa, p.427, (resumo), 1995.
- VINOD, C., H., BERA, M., B., Surface Heat Transfer Coefficient of Fafa Bean Puffed with Sand. **Journal of Food science and Technology**, v. 32, n. 2, p. 94-97, 1995.
- WATTS, K. C., BILANSKI, W. K. Method for Estimating the Thermal Diffusivity of Whole Soybeans. **Transaction of the ASAE**, 1143-1145, 1973.
- WILLIX, J., LOVATT, S. J., AMOS, N. D. Additional Thermal Conductivity Values of Foods Measured by a Guarded Hot Plate. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 37, p. 159-174, 1998.
- WINIARSKI, D. W., ONEAL, D. L., A Quasy-steady State Model of Attic Heat Transfer with Radiant Barriers. **Energy and Buildings**, v. 24, n. 3, p. 183-194, 1996. Obtido via base de dados Web of Science. Internet. Dez 1999.
- WRATTEN, F.T., POOLE, W.D., CHESNESS, J.L., BAL, S.; RAMARAO,V. Physical and thermal properties of rough rice. **Transactions of the ASAE**, v. 12, n. 6, p. 801-803, 1989.
- ZURITZ, C.A., SASTRY, S.K., McCOY, S.C., et. al. A modified Fitch device for measuring the thermal conductivity of small food particles : **Transactions of the ASAE**, n. 39, p. 269-275, 1988.

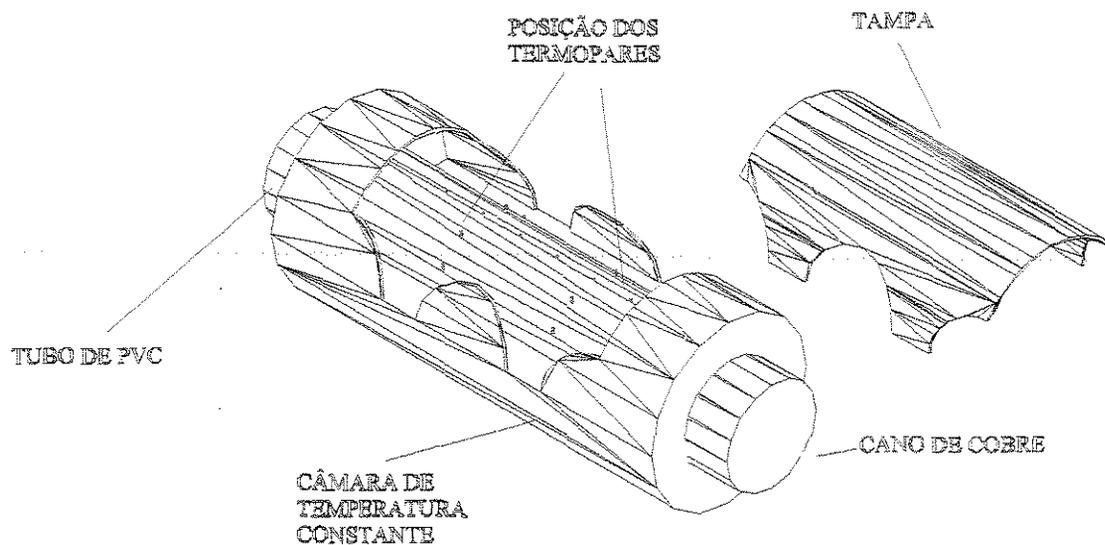
APÊNDICES

APÊNDICE 1: DADOS E RESULTADOS OBTIDOS EM DISQUETE

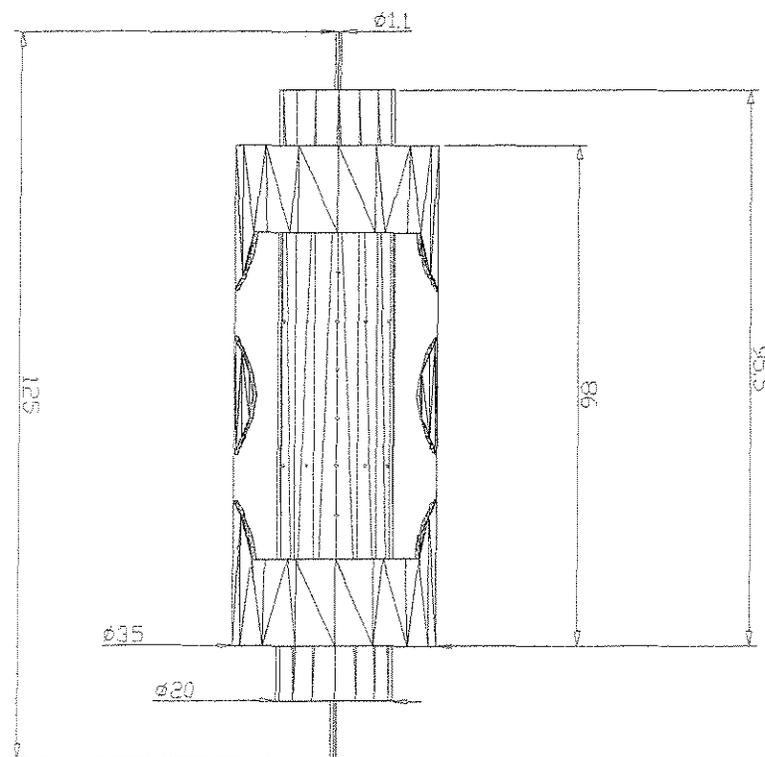
Em disquete anexo encontram-se todos os dados e resultados obtidos durante a fase experimental. O formato das planilhas é do Microsoft Excel 97 e estão discriminadas a seguir:

Nome do Arquivo	Assunto
Dados Prop. Físicas.doc	Dados e resultados das propriedades físicas (densidade real e aparente e diâmetro médio) dos materiais testados.
Resultados sonda.xls	Dados e resultados para o método da Sonda.
Resultados permanente.xls	Dados e resultados para o método da Permanente.
Resultados equilíbrio.xls	Dados e resultados para o método do Equilíbrio Dinâmico.

APÊNDICE 2: DESENHOS ESQUEMÁTICOS DO EQUIPAMENTO PARA O MÉTODO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO



Perspectiva explodida do cilindro e da câmara de temperatura constante.



Vista superior do cilindro (cotas em centímetros).