

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA
GELATINA COM VARIAÇÃO DE UMIDADE -
APLICAÇÃO AO PROCESSO DE SECAGEM**

LUIZA HELENA COSTA DUTRA SOUSA
Eng^o- Mecânico, EFEI, 1985

Orientador : Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Prof. Titular - FUEM
Co-orientador : Prof. Dr. Ivo Neitzel
Prof. Adjunto - FUEM

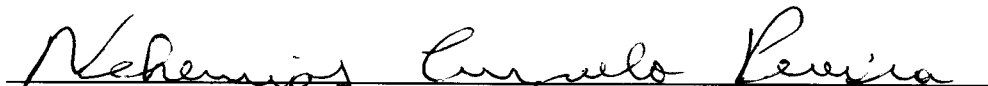
Dissertação de Mestrado submetida à
Fundação Universidade Estadual de
Maringá, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Química, área
de Desenvolvimento de Processos.

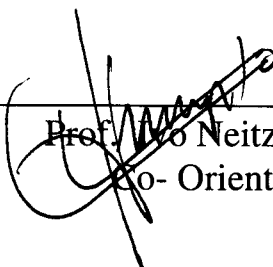
Maringá, PR - Brasil
1996


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

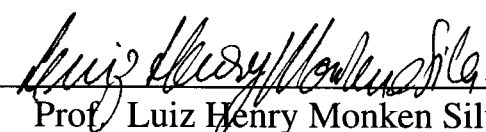
Esta é a versão definitiva da Dissertação de Mestrado submetida por Luiza Helena Costa Dutra Sousa, à Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química na data de 25 de Setembro de 1996.

COMISSÃO JULGADORA


Prof. Nehemias Curvelo Pereira, D.Sc.
Orientador


Prof. João Neitzel, D.Sc.
Co-Orientador


Prof. Alberto Luiz de Andrade, D.Sc.
Membro


Prof. Luiz Henry Monken Silva, D.Sc.
Membro

Dedico

A Deus
que sempre está a meu lado, renovando minhas forças e
mostrando-me os caminhos a seguir

Ao meu esposo
Leonardo
por seu amor traduzido em
compreensão, carinho e incentivo constantes
e aos meus filhos
Diego e Pablo,
que mantiveram a dignidade de crianças em meus momentos
de ausência, e pelos quais todo e qualquer esforço vale a pena

Aos meus pais
pelo esforço contínuo para que um dia eu pudesse estar
aqui, além da fonte de carinho e estímulo que são

Ao meu cunhado Carlos Roberto Leite
que acreditou em minha capacidade e aguçou minha força de
vontade

A todos de minha família
que em nenhum momento deixaram de me transmitir palavras
de ânimo e incentivo

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. Nehemias Curvelo Pereira, pela paciência e incentivo, e ainda pelas lições que me valerão por toda a vida.

Ao professor Dr. Ivo Neitzel, pela disponibilidade e incentivo constantes.

À professora Dr^a. Gizella Maria Zanin, pela amizade, pelo carinho, pelo incentivo e acompanhamento durante todo o período de convívio.

Ao Eng. Pedro Rebola, pelo incentivo, dedicação e colaboração na montagem e desenvolvimento do equipamento.

Ao amigo Fernando Franco Queiroz, pela colaboração na construção e montagem dos equipamentos.

Ao amigo Milton José Gonçalves Ferraz pela colaboração na realização dos testes iniciais.

À Marilza Sadako Kuabara Nery, por sua atenção, paciência, disponibilidade e confiança.

À professora Carmem Lúcia da Rocha Pietrobon por sua contribuição no desenvolvimento dos testes.

A todos os meus colegas de curso, pela amizade, colaboração e incentivo, em especial à amiga Brasília e aos amigos Plínio e Edson.

Aos amigos funcionários do DEQ/PEQ, que estiveram sempre presentes e interessados pelo desenvolvimento deste trabalho, em especial aos amigos Orisvaldo e Edilma.

Aos professores que me incentivaram com carinho.

Ao Departamento de Física, na pessoa do professor Renato Cardoso Nery pelo empréstimo do equipamento para a construção dos termopares, e aos técnicos Jurandir e Márcio pela ajuda e instruções na confecção dos mesmos.

Aos colegas Ilário Salatino e Laércio Frare, alunos da Iniciação Científica, pela colaboração no desenvolvimento dos experimentos.

À Leiner Gelatinas do Brasil Ltda, pelo fornecimento da matéria-prima, e aos engenheiros Valdemir Simões de Melo, Edson Minoru Yagima, Júlio César Oliveira Barbosa, Cláudio Francisco de Oliveira, Marcelo de Sousa Shuab e à engenheira Maria Aparecida, pela atenção e disponibilidade e às secretárias Rosana e Nelci pelo pronto atendimento.

À Cimento Votorantin pela atenção e fornecimento de amostras de cimento e gesso para a realização de algumas medidas.

A todos aqueles que facilitando ou dificultando minha jornada, a dignificaram tanto.

À CAPES, pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido efetivado.

RESUMO

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA GELATINA COM VARIAÇÃO DA UMIDADE - APLICAÇÃO AO PROCESSO DE SECAGEM

Sendo a gelatina uma substância de grande importância para as indústrias em geral, devido às suas propriedades coagulativas, protetoras e adesivas, estudou-se a sua condutividade térmica, a qual é um dos parâmetros de grande influência no processo de secagem.

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho, além do interesse direto da indústria, foi a não existência na literatura de dados de condutividade térmica em função da umidade para gelatinas industriais.

Para a determinação experimental do valor da Condutividade Térmica da Gelatina, foram utilizados os métodos de placas paralelas em regime permanente, e de sonda linear em regime transiente.

O equipamento de sonda linear foi usado somente a título comparativo e dos dois equipamentos de placas paralelas o que apresentou bons resultados é o que possui menor área superficial, pois observa-se que a inércia térmica exerce grande influência sobre o sistema de medidas com área superficial maior, resultando, dados experimentais não confiáveis.

A gelatina, retirada das câmaras de secagem do secador da Leiner Gelatinas do Brasil Ltda e utilizada nos experimentos, apresentava-se na forma de cilindros com diâmetros aproximados de 3,0 mm e comprimento de 300,0 mm, sendo transformados em pequenas partículas para que ocorresse a perfeita acomodação da amostra na célula de medida, tornando-a homogênea e compacta.

Os resultados experimentais obtidos no equipamento de placas paralelas demonstram uma forte dependência linear da condutividade térmica da gelatina com o teor de umidade, variando esta entre 0,128 e 0,467 kcal/h.m.°C, para umidades de 10% a 75% respectivamente.

Estes resultados foram comparados com os obtidos utilizando-se sondas lineares demonstrando a eficiência do método utilizado bem como a boa performance do equipamento.

ABSTRACT

THERMAL CONDUCTIVITY OF GELATIN ANALYSIS WITH MOISTURE VARIATION - DRYING PROCESS APPLICATION.

Gelatin is a very important product for industries due to its coagulative, protective and adhesive properties. This work deals with the experimental determination of thermal conductivity of gelatin, which is an important parameter for its drying process.

The main motivation for carrying out this work was the industrial interest in developing a better quality gelatin product. It was verified a lack of experimental data concerning the thermal conductivity of industrial gelatin in function of moisture. This data are quite important for designing dryers.

Parallel plates and linear probes were used under conditions of permanent and transient regimes respectively, for determining the experimental gelatin thermal conductivity.

The linear probe was used as a comparison basis for a large and an small parallel plates. Better results were obtained with the smaller area plates, which are less prone to thermal inertia.

The industrial gelatin used was provided by Leiner Gelatin of Brazil Ltd, which presented in cylinders shapes having around 3,0 mm diameter and 300,0 mm length. This gelatin material was transformed in smaller particles than its original size, for a perfect accommodation of an homogeneous and compact sample in the measurement cell.

Experimental results obtained with parallel plates have demonstrated that the thermal conductivity has a linear dependency of the moisture percentage. Thermal conductivity values varied from 0.128 up to 0.467 Kcal/(h.m.°C) for moisture values varying from 10% up to 75% respectively.

Results of thermal conductivity obtained with the parallel plates when compared to those obtained by using linear probes, demonstrates that the use of parallel plates, specially the small plates, is an efficient method for determining thermal conductivity.

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
<u>2.1 A Indústria de gelatina</u>	4
2.1.1 A gelatina	5
<u>2.2 Secagem</u>	8
2.2.1 Secagem de gelatina.....	10
2.2.2 O Secador de Gelatinas da Leiner.....	12
<u>2.3 Condutividade Térmica</u>	15
2.3.1 Condutividade Térmica Efetiva	15
2.3.2 Determinação da Condutividade Térmica Efetiva em Regime Permanente	17
2.3.2.1 Cálculo da Condutividade Térmica em Regime Permanente.....	18
2.3.3 Determinação da Condutividade Térmica Efetiva em Regime Transiente	20
2.3.3.1 Cálculo da Condutividade Térmica em Regime Transiente.....	21
<u>2.4 Umidade</u>	24
2.4.1 Equações para a Determinação da Umidade	25
<u>2.5 O Modelo Matemático da Secagem de Gelatina</u>	26
III - MATERIAIS E MÉTODOS	28
<u>3.1 A Matéria-prima</u>	28
<u>3.2 Termopares</u>	29
<u>3.3 Equipamentos de Medida da Condutividade Térmica</u>	30
3.3.1 Equipamento de Placas Paralelas I.....	30
3.3.2 Equipamento de Placas Paralelas II	34

3.3.3 Sondas Lineares.....	39
<u>3.4 Medidas de Umidade</u>	41
IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
<u>4.1 Calibração dos termopares</u>	43
<u>4.2 Aferição dos equipamentos</u>	45
4.2.1 Comparação entre Termômetro Digital versus Milivoltímetro.....	45
4.2.2 Condutividade Térmica de Materiais Diversos em Regime Transiente.....	46
4.2.3 Condutividade Térmica de Materiais Diversos em Regime Permanente - Equipamento II.....	56
4.2.3.1 Condutividade Térmica do Acrílico	56
4.2.3.2 Condutividade Térmica do Polipropileno (Tecnil).....	59
4.2.3.3 Condutividade Térmica de Diversos Materiais em Regime Permanente	60
<u>4.3 Resultados em Regime Permanente das Amostras de Gelatina</u>	62
4.3.1 Condutividade Térmica da Gelatina - Equipamento I.....	62
4.3.2 Condutividade Térmica da Gelatina - Equipamento II.....	62
V - CONCLUSÕES.....	94
VI - RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES	96
VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
VIII - ANEXOS.....	102
<u>8.1 Modelo Matemático de Silva (1995)</u>	102
8.1.1 Nomenclatura	102
8.1.2 Modelagem da Secagem da Gelatina no Interior do Leito.....	104
8.1.2.1 Balanço de quantidade de movimento no gás.....	104
8.1.2.2 Balanço de massa no gás	104
8.1.2.3 Balanço do componente água no gás.....	104
8.1.2.4 Balanço de energia no gás	104
8.1.2.5 Balanço de massa na gelatina	105

8.1.2.6	Balanço de energia na gelatina	105
8.1.2.7	Taxa de secagem primeira fase	105
8.1.2.8	Taxa de secagem segunda fase	106
8.1.2.9	Conversão de unidades de umidade do ar	106
8.1.3	Modelagem da Secagem da Partícula Cilíndrica de Gelatina	106
8.1.3.1	Balanço de massa na partícula cilíndrica de gelatina	106
8.1.3.2	Balanço de energia na partícula cilíndrica de gelatina	107
8.1.3.3	Transformação da umidade base úmida (BU) em umidade base seca (BS).....	107
8.2	<u>Aferição Termômetro Digital / Milivoltímetro</u>	108
8.3	<u>Fotografias Equipamento</u>	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxo de Produção de Gelatina	6
Figura 2.2	O Secador de Esteira Simplificado	14
Figura 2.3	Esquema de Disposição da Célula de Medida	18
Figura 2.4	Composição água-matéria seca de um corpo sólido	24
Figura 3.1	Localização dos Termopares - Equipamento I	31
Figura 3.2	Esquema Geral do Equipamento de Placas Paralelas I - Modificado	33
Figura 3.3	Detalhe da Célula de Medida do Equipamento II	36
Figura 3.4	Esquema Geral do Equipamento de Placas Paralelas II	38
Figura 3.5	Esquema de Montagem do Sistema de Sondas	41
Figura 4.1	Linearização dos Termopares à 25°C e 50°C	44
Figura 4.2	Linearização dos Termopares à 15°C e 30°C	45
Figura 4.3.1.a	Gelatina do Extrusor teste 01 Todos os pontos - Sonda I	48
Figura 4.3.1.b	Gelatina do Extrusor teste 01 Primeiros pontos - Sonda I	49
Figura 4.3.1.c	Gelatina do Extrusor teste 01 Últimos Pontos - Sonda I	49
Figura 4.4.1.a	Gelatina do Extrusor teste 01 Todos os Pontos - Sonda III	53
Figura 4.4.1.b	Gelatina do Extrusor teste 01 Primeiros Pontos - Sonda III	53
Figura 4.4.1.c	Gelatina do Extrusor teste 01 Últimos Pontos - Sonda III	54
Figura 4.5	Evolução da Condutividade Térmica da Gelatina com a Umidade	77
Figura 4.6	Evolução da Condutividade Térmica Efetiva da Gelatina com a Umidade	92
Figura 6.1	Esboço da Câmara de Medida Modificada	97
Figura 8.2.1	Comparação Termômetro Digital vs Milivoltímetro	108
Figura 8.2.2	Comparação Milivoltímetro vs Termômetro Digital	109
Figura 8.3.1	Fotografia do Equipamento de Placas Paralelas II	111
Figura 8.3.2	Fotografia da Célula de Medida do Equipamento de Placas Paralelas II	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1	Dimensões das Sondas Lineares	40
Tabela 4.1	Aferição dos Termopares à 25°C e 50°C	43
Tabela 4.2	Aferição dos Termopares à 15°C e 30°C	44
Tabela 4.3	Gelatina do Extrusor - Sonda I	47
Tabela 4.3.1	Condutividade Térmica da Gelatina do Extrusor Sonda I	51
Tabela 4.4	Gelatina do Extrusor - Sonda III	52
Tabela 4.4.1	Condutividade Térmica da Gelatina do Extrusor Sonda III	55
Tabela 4.5	Condutividade Térmica em Regime Transiente para alguns Sólidos Granulares	56
Tabela 4.6	Temperaturas Médias Placa de Acrílico I	57
Tabela 4.6.1	Condutividade Efetiva Média Placa de Acrílico I	57
Tabela 4.7	Temperaturas Médias Placa de Acrílico II	58
Tabela 4.7.1	Condutividade Efetiva Média Placa de Acrílico II	58
Tabela 4.8	Temperaturas Médias do Polipropileno	59
Tabela 4.8.1	Condutividade Efetiva Média do Polipropileno	60
Tabela 4.9	Condutividade Térmica em Regime Permanente para Materiais Diversos	61
Tabela 4.10	Temperaturas Médias para a Câmara 1	63
Tabela 4.10.1	Condutividade Efetiva Média	64
Tabela 4.10.2	Umidade	64
Tabela 4.11	Temperaturas Médias para a Câmara 2	65
Tabela 4.11.1	Condutividade Efetiva Média	66
Tabela 4.11.2	Umidade	66
Tabela 4.12	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 3	67
Tabela 4.12.1	Condutividade Efetiva Média	67
Tabela 4.12.2	Umidade	68
Tabela 4.13	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 4	68
Tabela 4.13.1	Condutividade Efetiva Média	69

Tabela 4.13.2	Umidade	69
Tabela 4.14	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 5	70
Tabela 4.14.1	Condutividade Efetiva Média	70
Tabela 4.14.2	Umidade	71
Tabela 4.15	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 6	71
Tabela 4.15.1	Condutividade Efetiva Média	72
Tabela 4.15.2	Umidade	72
Tabela 4.16	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 7	73
Tabela 4.16.1	Condutividade Efetiva Média	73
Tabela 4.16.2	Umidade	74
Tabela 4.17	Temperaturas Médias para Amostras da Saída do Secador	74
Tabela 4.17.1	Condutividade Efetiva Média	75
Tabela 4.17.2	Umidade	75
Tabela 4.18	Umidade ($\text{g}_{\text{ag}} / \text{g}_{\text{gel úmido}}$) X Condutividade ($\text{kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$)	76
Tabela 4.19	Temperaturas Médias para Amostras da Saída do Extrusor	78
Tabela 4.19.1	Condutividade Efetiva Média	79
Tabela 4.19.2	Umidade	79
Tabela 4.20	Temperaturas Médias para Amostras da Entrada do Secador	80
Tabela 4.20.1	Condutividade Efetiva Média	80
Tabela 4.20.2	Umidade	81
Tabela 4.21	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 1	81
Tabela 4.21.1	Condutividade Efetiva Média	81
Tabela 4.21.2	Umidade	82
Tabela 4.22	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 2	82
Tabela 4.22.1	Condutividade Efetiva Média	83
Tabela 4.22.2	Umidade	83
Tabela 4.23	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 3	83
Tabela 4.23.1	Condutividade Efetiva Média	84
Tabela 4.23.2	Umidade	84
Tabela 4.24	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 4	84
Tabela 4.24.1	Condutividade Efetiva Média	85
Tabela 4.24.2	Umidade	85

Tabela 4.25	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 5	86
Tabela 4.25.1	Condutividade Efetiva Média	86
Tabela 4.25.2	Umidade	87
Tabela 4.26	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 6	87
Tabela 4.26.1	Condutividade Efetiva Média	88
Tabela 4.26.2	Umidade	88
Tabela 4.27	Temperaturas Médias para Amostras da Câmara 7	89
Tabela 4.27.1	Condutividade Efetiva Média	89
Tabela 4.27.2	Umidade	90
Tabela 4.28	Temperaturas Médias para Amostras da Saída do Secador	90
Tabela 4.28.1	Condutividade Efetiva Média	91
Tabela 4.28.2	Umidade	91
Tabela 4.29	Umidade ($g_{ag} / g_{gel\ úmido}$) X Condutividade ($kcal/hm^{\circ}C$)	92
Tabela 8.2.1	Comparação Termômetro Digital vs Milivoltímetro	108
Tabela 8.2.2	Comparação Milivoltímetro vs Termômetro Digital	109

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O uso racional de energia tem levado as empresas a promoverem alterações nos sistemas de produção, com vistas à redução do custo final de seus produtos.

Para as indústrias que utilizam processos de secagem, o dimensionamento correto do secador, aumenta a eficiência operacional, bem como propicia a obtenção de melhor qualidade final do produto, como é o caso da produção de gelatina.

O dimensionamento de secadores de gelatina depende diretamente das propriedades físico-químicas deste produto. Devido às suas características peculiares o secador é dividido em câmaras nas quais um dos parâmetros importantes a ser analisado é a condutividade térmica do produto, que influencia diretamente no cálculo das temperaturas de cada uma das câmaras, bem como no dimensionamento das mesmas.

Este trabalho concentra-se no estudo experimental da determinação da condutividade térmica da gelatina, a partir de amostras retiradas do secador industrial da Leiner Gelatinas do Brasil Ltda. O secador da Leiner é do tipo esteira móvel, e o processo se realiza através da passagem de ar quente perpendicularmente ao fluxo de gelatina. As câmaras de secagem são dimensionadas de maneira tal a promover uma secagem homogênea da gelatina, cuja umidade inicial é de aproximadamente 70% base úmida, e ao término do processo, a umidade apresenta-se em torno de 10% base úmida.

O emprego de temperaturas elevadas, desde o início da secagem pode comprometer seriamente todo o processo. Inicialmente, a gelatina estando

muito úmida, o processo é comandado pela evaporação da umidade superficial da gelatina, ocorrendo a contração da mesma. O aparecimento de uma crosta endurecida na superfície dos “noodles” de gelatina dificulta a saída da umidade do seu interior, pois sabe-se que somente para umidades inferiores à 10%, no caso da gelatina, são encontrados poros em seu interior (Krisher & Kast - 1978).

Deste modo, uma dificuldade adicional no processo de secagem da gelatina é o efeito da temperatura sobre o gel. Para umidades elevadas o ponto de fusão (liquefação) é baixo, da ordem de 30°C, crescendo à medida que o teor de umidade diminui. Isto leva o secador a operar com um perfil de temperatura crescente, adequado à redução de umidade da gelatina, (Neitzel & Massarani - 1987) justificando a divisão do secador em câmaras.

Da análise do conjunto de equações que regem a secagem, conforme apresentada por Silva (1995), conclui-se que a condutividade térmica efetiva da gelatina é um dos parâmetros de fundamental importância para a determinação das temperaturas mais apropriadas nas diversas câmaras de secagem.

Para tanto construiu-se um equipamento apropriado, segundo os princípios de transmissão de calor conforme Holman (1982) e seguindo as diretrizes de Masamune & Smith (1963), Silveira & Freire (1984), Pietrobon (1988), Neitzel (1987) e Leiner Gelatinas do Brasil, para a determinação da condutividade térmica da gelatina, possibilitando que os modelos matemáticos existentes possam ser aperfeiçoados, pois em tais modelos toma-se como parâmetro de cálculo o valor da condutividade térmica da água, já que na literatura não se dispõe de dados desta propriedade física para gelatinas em função da umidade.

O conhecimento da condutividade térmica da gelatina em função da umidade, nos dará condições de, em cada câmara de secagem, submetê-la a

temperaturas que facilitem a difusão da umidade do seu interior para o exterior, sem causar danos ao processo e principalmente ao produto, uma vez que a gelatina deve ser secada lentamente, evitando que ocorra amolecimento ou fissura dos “noodles”.

O Equipamento de Placas Paralelas descrito no Capítulo III apresentou resultados bastante satisfatórios, pois para gelatinas muito úmidas obteve-se um valor de condutividade térmica muito próximo ao da água, e à medida que a umidade diminuiu a condutividade térmica também diminuiu confirmando as leis que regem o fenômeno da condução de calor. Analisados estes resultados podemos confirmar o desempenho do equipamento.

O método de Sondas Lineares utilizado para comparação, também apresentou-se bastante satisfatório desde que utilizado com sondas apropriadas para o tipo de material em análise.

Os resultados obtidos com o equipamento de placas paralelas, se comparados aos obtidos com as sondas lineares, apresentam-se dentro de faixas aceitáveis de variação, como poderá ser observado no Capítulo IV deste trabalho.

O modelo matemático desenvolvido por Silva (1995), poderá ser utilizado para descrever a secagem da gelatina, devendo entretanto ser adaptado, substituindo-se a condutividade térmica constante, pela expressão obtida em função da umidade.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Indústria de Gelatina

Em 1776 a companhia Leiner foi fundada e sediada no Império Austro-Húngaro. Em 1840 transferiu-se para Budapest, na Hungria. Em 1937, surgiu a P . Leiner & Sons Ltd., na Grã-Bretanha.

Com o desenvolvimento e a aplicação de tecnologia avançada, a P . Leiner & Sons Ltd, foi crescendo rapidamente obtendo excelente reputação perante seus clientes, devido a ótima performance dos produtos e a excelente qualidade dos serviços prestados. Suas gelatinas eram exportadas para as indústrias farmacêutica, alimentícia e fotográfica.

Em 1959, em sociedade com investidores brasileiros fundou-se a Leiner do Brasil Gelatinas Ltda. Sua tecnologia foi adaptada à produção de gelatinas com matéria-prima brasileira e às condições climáticas sub-tropical. Seus padrões de qualidade são os mais rígidos obedecendo um programa de “Garantia da Qualidade”, inspecionado por um comitê de especialistas, certificando-se de que o programa de controle seja sempre atual e efetivo.

Suas fábricas estão localizadas em Maringá-PR, em Estância Velha-RS, na Argentina e no México, todas estas gerenciadas pela sede localizada no estado de São Paulo. A Leiner está instalada também na África do Sul, Nova Zelândia e Austrália.

2.1.1 A gelatina

A gelatina é considerada uma proteína coloidal de grande importância comercial, devido as suas propriedades coagulativas, protetoras e adesivas.

Mundialmente são reconhecidos quatro tipos de gelatina, sendo a comestível, a técnica, a fotográfica e a farmacêutica, cada uma das quais desempenhando seu papel representativo no mercado.

Gelatina e cola são misturas complexas resultantes da hidrólise parcial do colágeno e a maior diferença entre estes materiais não são suas propriedades, mas o grau de pureza da mistura.

Vários são os fatores que influenciam no processo de fabricação da gelatina, dentre os quais se destacam pH, temperatura, matéria-prima, tipo de processamento e alterações biológicas e bioquímicas (Otmer, 1966).

As matérias-primas utilizadas para efetuar-se a extração da gelatina são os couros crus de grandes animais podendo ser também extraída de ossos animais e peles de porcos e novilhas. No caso da Leiner Gelatinas do Brasil Ltda, a gelatina é fabricada a partir de couro bovino.

Para a gelatina uma propriedade física bastante importante, comercialmente, é a rigidez do gel, sob condições padronizadas. O valor comercial cresce com o aumento da rigidez. O gelômetro de Bloom, (1929) é o equipamento utilizado para a medida da rigidez do gel. Ele determina o peso para fazer com que um êmbolo de 0,5 mm de diâmetro com ponta chata, abaixe a superfície da gelatina de 4 mm. Nas gelatinas comerciais o Bloom varia na faixa de 80 à 320 gramas Bloom. O objetivo do processo de produção de gelatinas é converter materiais contendo colágeno de diferentes graus de insolubilidade em gelatina solúvel e com boas propriedades físico-químicas, tais como alvura, viscosidade e rigidez (Ward, 1977).

As etapas de produção, que são apresentadas na Figura 2.1, seguem a ordem de fluxo industrial, onde a terceira etapa é a que serve de base para o nosso trabalho de pesquisa, pois está diretamente associada à secagem da gelatina.

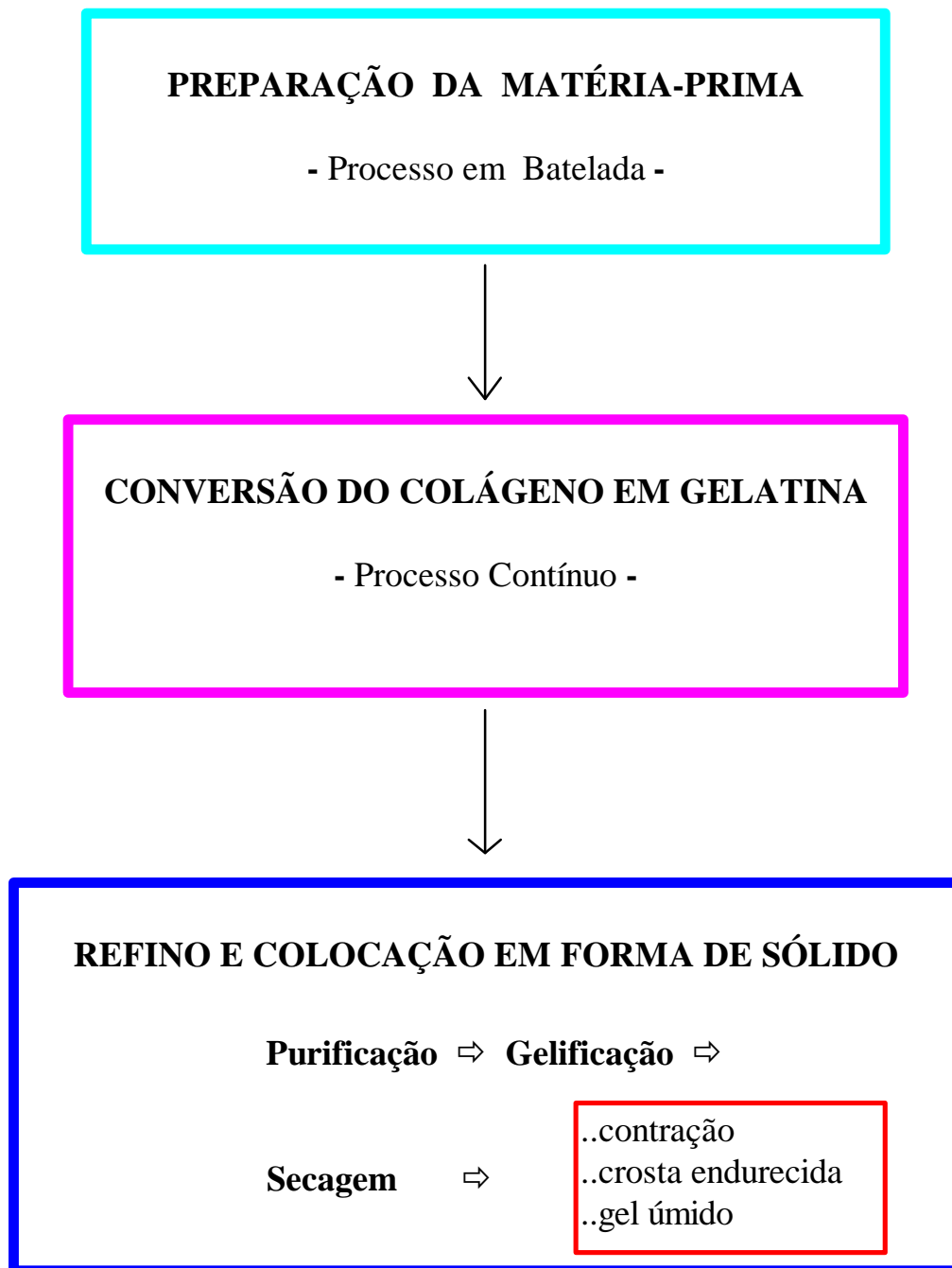


Figura 2.1 Fluxo de Produção de Gelatina

Preparação da matéria-prima : os couros utilizados para a fabricação da gelatina são couros imperfeitos, e primeiramente sofrem uma raspagem e diminuição de tamanho, sendo em seguida tratados com banhos ácidos para uma primeira eliminação de impurezas. Após esta etapa a matéria-prima encontra-se preparada para o início da extração do colágeno.

Conversão do colágeno e purificação da gelatina : nesta etapa inicia-se a extração do colágeno, realizada através da imersão da matéria-prima em banhos com água quente, cuja temperatura inicial varia na faixa dos 40°C à 50°C, finalizando o processo à temperatura de ebulição.

Refino e colocação da gelatina em forma de sólido : a solução extraída é submetida a um tratamento de clarificação e filtração para que sejam eliminadas as gorduras e partículas insolúveis que se encontram em suspensão. Ocorre um processo de branqueamento que usualmente é realizado com peróxido de hidrogênio, seguido das operações de filtração e centrifugação. São utilizados evaporadores múltiplo efeito para a remoção da água contida no licor de gelatina; posteriormente a solução de gelatina é bombeada para um extrusor. Este extrusor é encamizado por um sistema de gelificação utilizando como fluido a amônia conferindo ao gel a forma de sólido, que ao ser extrusado adquire o formato de filamentos cilíndricos com diâmetro aproximado de 3,0 mm denominados “noodles”. Estes filamentos são submetidos a um processo de secagem sendo vagarosamente “despejados” em uma esteira perfurada móvel, que adentra a um secador subdividido em câmaras, onde atinge a umidade final desejada. Normalmente esta umidade se encontra em torno de 10% base seca, pois até esta umidade a gelatina pode ser considerada um material higroscópico, termosensível e não poroso, para efeito de secagem (Neitzel, 1990).

2.2 Secagem

Secar um sólido significa, em geral, eliminar quantidades relativamente pequenas de água, ou de outro líquido, contidos em um material sólido com o fim de reduzir o conteúdo líquido residual até um valor aceitavelmente baixo (McCabe & Smith, 1976).

Para umidades elevadas, verificou-se experimentalmente, que a velocidade inicial de secagem corresponde à velocidade de evaporação da água, com gradativa diminuição, sem apresentar um ponto nítido de umidade crítica, até assumir o valor zero (Krisher & Kast, 1978).

Bruin & Luyben (1980) evidenciaram três tipos de problemas na secagem de produtos alimentícios:

- alterações do produto durante a secagem: os produtos alimentícios dependem da temperatura, da atividade química e do tempo de secagem. O processo de desidratação influencia na qualidade dos alimentos sob vários aspectos, dentre os quais a ocorrência de conversões químicas e mudanças físicas no alimento durante a secagem;
- aspectos físicos e matemáticos do processo de secagem: o conhecimento dos fenômenos de transporte e das propriedades termofísicas e de equilíbrio termodinâmico, habilitam a interpretar o comportamento da secagem de materiais como uma função do tempo;
- otimização do processo de secagem: os secadores são selecionados e projetados de tal modo a fornecer a melhor combinação de custo e qualidade, pois no custo da secagem, o consumo de energia é um dos fatores principais.

Tendo em vista a importância deste processo, detecta-se na secagem de alimentos, a necessidade da determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a secagem, incluindo os efeitos da variação biológica, para diferentes faixas de umidade (Chirife, 1983).

Sendo a secagem um processo de remoção de umidade de uma substância, através do fornecimento de calor ocorrem transferências simultâneas de calor e massa. Portanto, ao avaliar-se a eficiência do processo de secagem, o aproveitamento útil do calor deve ser um dos principais critérios (Coulson & Richardson, 1991).

A remoção de umidade de um corpo pode resultar em contração de volume e quando o encolhimento não for uniforme, ocorrem diferentes graus de contração e as partículas podem sofrer tensões, partir e apresentar fendas. Se a secagem é rápida pode ocorrer endurecimento da superfície e a região externa encolhe sobre a região central que mantém um alto conteúdo de umidade (Tobinaga & Pinto, 1992).

Nos produtos cristalinos é preciso assegurar que os cristais não sejam danificados, já, com produtos farmacêuticos, deve-se evitar a contaminação. No caso do papel deve-se evitar a contração, no caso da madeira, a fissuração e da fruta a perda do sabor (Coulson & Richardson, 1991).

Para o caso específico da gelatina o principal cuidado a ser levado em consideração é com suas propriedades físicas, tais como resistência, viscosidade, ausência de cor e elevada claridade (Neitzel, 1990).

Normalmente uma análise bem sucedida leva à otimização do desempenho da secagem, de forma a reduzir ao mínimo o consumo de energia e prevenir o colapso operacional, evitando que o sistema ultrapasse as condições térmicas que preservam a integridade do produto (Neitzel & Massarani, 1987).

2.2.1 Secagem de gelatina

A gelatina apresenta um comportamento bastante característico na secagem, sendo semelhante ao comportamento de materiais como borracha sintética, pectina, albumina, Nylon, Perlon, Polystyrol, Poliuretano e outros; é um produto coloidal sem vasos capilares e espaços intercelulares (Silva, 1995).

As características térmicas dos materiais acima mencionados, principalmente a de se liquefazer a altas temperaturas, determinam uma velocidade de secagem lenta, iniciando com a temperatura do ar de secagem próxima à temperatura ambiente (Ward & Courts, 1977).

Nestes materiais, a umidade não está fixada à substância apenas por forças físicas, mas também por mecanismos físico-químicos, tais como hidratação, ligações osmóticas e ligações estruturais (Neitzel & Massarani, 1987).

Quando a água é retirada por meio da secagem, a gelatina inicialmente úmida (70 % base úmida), apresenta-se sob a forma de um fluido viscoso e ao secar (10 % base úmida) torna-se sólida e quebradiça.

Na secagem destes materiais, que é normalmente acompanhada de contração de volume, ao passar do estado viscoso, denominado "Lyosol" da solução com elevado teor de umidade para o estado visco-elástico, denominado "Lyogel" ocorre uma redução de volume aproximadamente equivalente ao volume do solvente evaporado (Neitzel & Massarani, 1987).

Krisher & Kast (1978), constataram a inexistência de poros internos na gelatina, devido ao seu comportamento ideal da redução de volume durante a secagem até umidades 10% base seca.

Bertoli & Neitzel (1990), realizando a simulação de um secador de esteira, observaram que, quando a gelatina apresenta-se com baixas umidades, em torno do 10% base seca, a tendência da curva se dispersa, descaracterizando uma curva teórica de secagem. Este fato os levou à realização de avaliações mais rigorosas, relacionadas aos parâmetros tomados como referência em sua modelagem, tal como a condutividade térmica da gelatina, o coeficiente de difusão e o encolhimento.

Da análise dos diversos tipos de umidade que envolvem um processo de secagem, conforme apresentados por Treybal (1968), constatou-se que a secagem da gelatina depende inicialmente da evaporação da “água livre” caracterizando nitidamente uma região de taxa de secagem constante (Bertoli & Neitzel, 1990). Neste período a temperatura é um fator crítico no processo, devido a contração rápida ou a facilidade de liquefação do gel.

O estudo da contração mostra que este comportamento pode ser considerado ideal por toda faixa útil de secagem e que passada esta região inicial a taxa de secagem vai ser controlada pela lenta difusão líquida da água no produto. Este fato provoca o aparecimento de uma capa de gelatina parcialmente seca em torno dos “noodles” dificultando ainda mais a migração da água. Esta situação pode ser explorada aumentando a temperatura do ar de secagem pois a capa protege a gelatina contra a liquefação (Neitzel & Massarani, 1987).

A teoria da migração de água por difusão apoia-se exclusivamente na lei de Fick, expressa em termos de gradiente de umidade e por isso pode-se afirmar que : a difusão é resultante do gradiente de concentração do líquido no centro do sólido, onde a concentração de umidade é alta, e na superfície onde a concentração é baixa. Os primeiros pesquisadores a se referirem explicitamente a esta lei foram Lewis e Sherwood, quando interpretaram a secagem como um fenômeno de difusão de água líquida, porém, tal como as

teorias recentes, não levaram em consideração o encolhimento, o endurecimento ou as isotermas de equilíbrio (Tobinaga & Pinto, 1992).

O significado físico do coeficiente de difusão pode ser interpretado como uma junção de todos os efeitos simultâneos, sendo dependente da concentração e da temperatura. Sendo assim, teoria da difusão é aplicada mais por causa de sua forma matemática do que pelas razões teóricas relativas aos fenômenos físicos (Daudin, 1983).

Após verificadas as avaliações de (Neitzel, 1995), optou-se inicialmente por realizar um estudo da condutividade térmica, devido a falta de informações, na literatura, desta propriedade e principalmente devido a sua importância no desenvolvimento da modelagem da secagem de gelatina. O conhecimento da tendência da evolução desta propriedade em função da umidade facilitará a definição das temperaturas de secagem em cada uma das câmaras do secador industrial, de maneira tal a promover maior coesão entre as moléculas no interior da gelatina, fazendo com que expulsem mais rapidamente a água para o exterior, desde o início do processo.

Verificou-se ainda que Silva (1995) em sua modelagem matemática considerou a condutividade térmica da gelatina como sendo constante, igual a da água em todo o percurso da secagem, e as análises realizadas nesta dissertação servirão para verificar a influência desta estimativa de parâmetro.

2.2.2 O Secador de Gelatinas da Leiner

Industrialmente o secador utilizado é o do tipo esteira, com fluxo de ar quente passando perpendicularmente ao fluxo de gelatina.

As características térmicas da gelatina exigem que o secador seja subdividido em câmaras independentes para que o perfil de temperatura de secagem seja crescente, apropriado para a gradativa redução de umidade da gelatina (Neitzel, 1990).

Um extrusor alimenta a esteira com os filamentos cilíndricos úmidos (70% base úmida) de gelatina de maneira uniforme, fazendo com que a camada de gelatina sobre a esteira tenha uma espessura não superior a 15 cm. A velocidade da esteira é diretamente proporcional à espessura da camada de gelatina.

O secador de esteira industrial se encontra instalado na parte superior de um túnel, longo o suficiente para acomodar oito câmaras de secagem consecutivas e isotérmicas, com área de secagem de 16,6 m² e comprimento de 4,15 m cada uma. Na parte inferior deste túnel encontram-se trocadores de calor, que efetuam as trocas térmicas do ar de secagem, sendo em seguida ventilado para a câmara seguinte com a temperatura especificada para aquela câmara. A gelatina permanece não mais que 18 minutos em cada câmara de secagem.

Na quarta câmara de secagem pode ser realizada, opcionalmente, uma retirada de ar para a atmosfera.

A temperatura inicial do ar de secagem não ultrapassa a temperatura ambiente, que no local gira em torno dos 30°C, finalizando com temperatura próxima dos 55°C. Ao término do processo os filamentos disformes de gelatina chegam na oitava câmara com umidade em torno de 10% (base úmida) e está pronta para ser moída e estocada.

A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado do secador industrial, onde pode-se verificar as trocas de ar quente efetuadas no processo através dos sentidos indicados pelas setas.

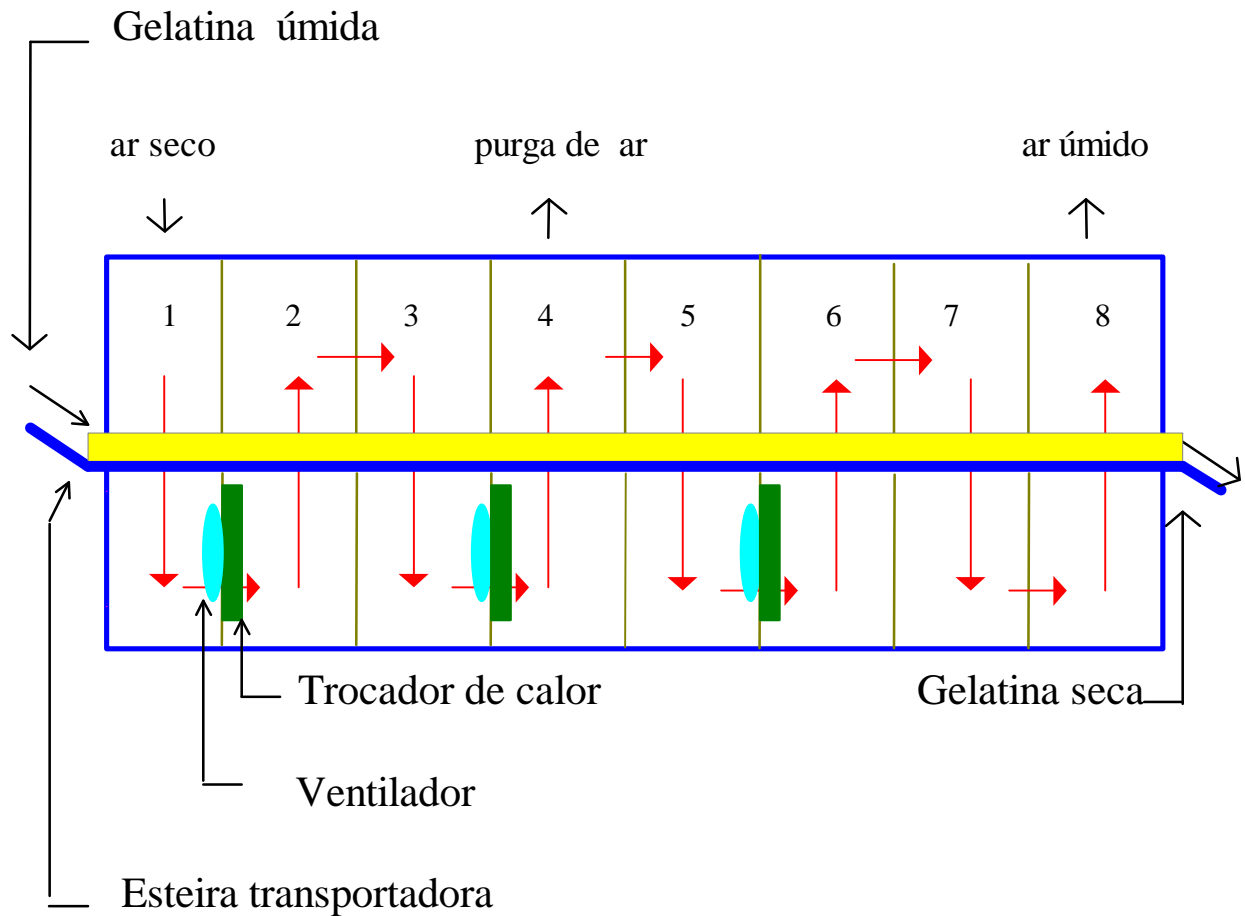


Figura 2.2 Secador de Esteira Simplificado

O secador é alimentado ininterruptamente, e por isso o processo de secagem é denominado processo contínuo, pois a descontinuidade propicia a obtenção de um produto final em condições desfavoráveis de comercialização.

2.3 Condutividade Térmica

2.3.1 Condutividade Térmica Efetiva

A condutividade térmica denotada k , pela literatura em geral, não é um valor facilmente obtido experimentalmente para qualquer tipo de substância (Pietrobon, 1988), pois sofre influência da constituição química, do estado físico e da umidade do material em análise.

Desde Bates (1933), muitas pesquisas e estudos direcionados, vêm sendo desenvolvidos para aprimorar os vários métodos de determinação da grandeza condutividade térmica, aplicados em regime permanente e em regime transiente.

Muitos pesquisadores têm-se empenhado em idealizar um equipamento que realize medidas de condutividade térmica de materiais diversos, sendo que, as tentativas de modificações sempre buscam valores mais confiáveis, facilidade de manuseio e versatilidade.

É possível analisar os efeitos térmicos em um meio poroso, no qual ocorre um escoamento de fluido, porém, para isto é necessário que se tenha conhecimento do comportamento da condutividade térmica do sistema e neste caso apesar do processo de transferência de energia e massa ser bastante complexo, é possível definir uma condutividade térmica eficaz (Silveira & Freire, 1984).

Os valores de condutividade térmica da gelatina não se encontram disponíveis na literatura e o interesse industrial é grande, pois, uma vez obtida sua ordem de grandeza, pode significar além de economia em termos de consumo de energia, ganho na qualidade do produto final obtido.

Atualmente, é crescente o número de pesquisas em torno da utilização de células imobilizadas para efetuar fermentações alcoólicas, e a técnica mais extensamente utilizada é a imobilização através do envolvimento de células microbianas em géis hidrofílicos e dentre os vários suportes poliméricos utilizados encontra-se a gelatina sendo para estes sistemas imprescindível o conhecimento do comportamento da condutividade térmica (Silveira & Freire, 1984).

É de conhecimento que a condutividade térmica de materiais termossensíveis, varia com a umidade e a obtenção da curva que descreve o fenômeno é de grande validade em aplicações de secagem. Segundo Vargafitk et all (1994), existe uma variedade muito grande de técnicas experimentais utilizadas para a determinação da condutividade térmica de gases e líquidos, e algumas destas técnicas são utilizadas também para medidas de condutividade térmica de sólidos.

Danis, Gobbé & Royer (1996), afirmam que a curva que descreve a função condutividade térmica versus umidade é quase linear, porém não constante. Portanto pode-se perfeitamente linearizar a curva obtida, seja por partes, unindo os pontos da melhor maneira a se apresentarem como retas bem definidas, seja como uma única reta passando pelos pontos experimentais determinados, facilitando desta forma o desenvolvimento de modelos matemáticos mais simplificados.

Vargafitk et all (1994) apresenta os métodos de medida de condutividade térmica efetiva, juntamente com suas equações matemáticas e dentre os métodos mais comumente utilizados estão os cilindros concêntricos, esferas concêntricas e placas paralelas todos trabalhando em regime permanente, e o método de sondas lineares para regime transiente.

2.3.2 Determinação da Condutividade Térmica Efetiva em Regime Permanente

A metodologia das várias técnicas de medida de condutividade térmica é sempre a mesma; estabelecido o regime mede-se a distribuição de temperatura nos padrões de referência e na camada de material de teste, e juntamente com as espessuras do padrão e da amostra, determina-se a condutividade térmica do material testado. Pietrobon (1988), faz um breve relato dos principais equipamentos desenvolvidos para regime permanente e Tye (1969), detalha todas as técnicas aplicadas neste regime.

Os pesquisadores Ogiwara, Arai & Satto (1980), reuniram as mais significativas modificações de todas as tentativas realizadas, e desenvolveram um equipamento de medida de placas paralelas em regime permanente, servindo de base para pesquisas mais recentes, tais como as de Pietrobon (1988), que utilizou placas padrão quadradas de vidro, hermeticamente fechadas, para a determinação da condutividade térmica de líquidos e géis compostos e a pesquisa de Silveira & Freire (1984), que determinaram a condutividade térmica do gel-melaço, em equipamento de processo similar, porém de forma geométrica cilíndrica para o padrão de referência, utilizando como isolamento térmico da célula de medida o vácuo. Com base nos resultados obtidos por Silveira & Freire, (1984) nossa primeira suposição é a de que a condutividade térmica da gelatina, seja próxima da condutividade térmica do gel-melaço.

Vargafitk et all (1994), recomendam que as perdas por convecção sejam sempre minimizadas para não interferirem nos resultados finais, e isto se consegue com um isolamento térmico eficiente, adequado ao sistema, posicionando a placa aquecida sobre a amostra de teste, e o fluxo de calor deve ser unidirecional, vertical e descendente.

É também recomendado, para regime permanente, que as placas padrão de referência tenham condutividade térmica da mesma ordem de grandeza da amostra de teste (Silveira & Freire, 1984).

A geometria cilíndrica para as placas padrões de referência e amostras de teste será melhor aplicada, a fim de minimizar os efeitos de borda, conforme verificado nas pesquisas de Ogiwara, Arai & Satto (1980).

2.3.2.1 Cálculo da Condutividade Térmica em Regime Permanente

A Figura 2.3 apresenta um esquema do modelo físico para o sistema de placas paralelas, onde um anel de um material qualquer, envolve uma determinada amostra, cujo diâmetro interno é d_a e o diâmetro externo d_p .

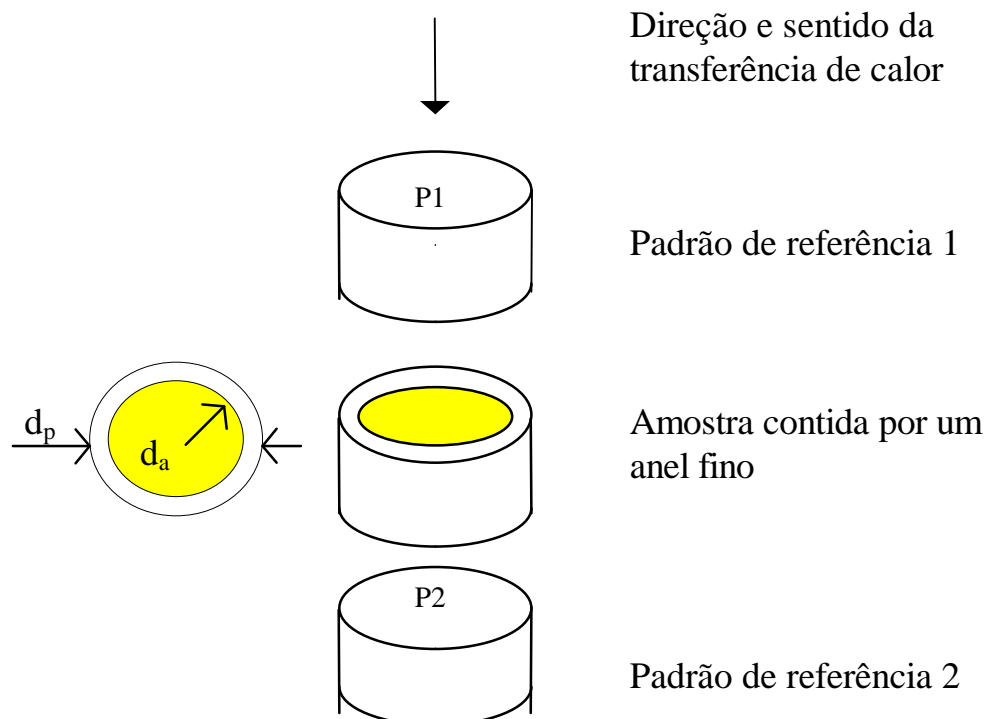


Figura 2.3 Esquema da Disposição da Célula de Medida (sem escala)

As áreas são escritas para a amostra (A_a) e para o padrão (A_p), respectivamente, pelas relações:

$$A_a = \frac{\pi d_a^2}{4} \quad (2.1)$$

e

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (2.2)$$

Para este modelo físico a taxa de calor (q) transferido por condução é dada pela relação:

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} \quad (2.3)$$

e

$$R = \frac{x}{k A} \quad (2.4)$$

sendo:

- A a área do material [m^2]
- k a condutividade térmica [$kcal/h.m.^{\circ}C$]
- R a resistência do material [ohms]
- T a temperatura [$^{\circ}C$]
- x a espessura do material [m]

O sub-índice (a) aplica-se á amostra e o sub-índice (p) aplica-se ao padrão.

Para dois materiais diferentes, utiliza-se a resistência equivalente (R_{eq}), composta pela resistência da amostra (R_a) e pela resistência do anel que contém a amostra (R_{anel}), podendo ser escrita da seguinte forma:

$$R_{eq} = \frac{R_a R_{anel}}{(R_a + R_{anel})} \quad (2.5)$$

Admitindo-se que a taxa de calor que passa pelos padrões é igual à taxa de calor que atravessa o meio, pode-se afirmar que :

$$\frac{k_p \Delta T_p A_p}{x_p} = \frac{\Delta T_a}{R_{eq}} \quad (2.6)$$

2.3.3 Determinação da Condutividade Térmica Efetiva em Regime Transiente

Neste regime a literatura destaca o uso de sondas idealizadas para o tipo de material que se deseja determinar a condutividade térmica. Pietrobon, (1988), descreve de maneira clara e objetiva a metodologia do emprego de sondas lineares.

Neste trabalho foram utilizadas sondas lineares, somente a título de comparação, para se ter uma idéia inicial da ordem de grandeza da condutividade térmica da gelatina, haja visto que a literatura não dispõe destes valores para gelatina em função da umidade, e também verificar o desempenho do equipamento de placas paralelas, comparando os valores obtidos para materiais como cimento e gelatina, nos dois sistemas de medidas de condutividade térmica utilizados.

Vargafitk et all (1994) esboça as técnicas mais comumente utilizadas em método não estacionário para medidas de condutividade térmica, apontando os principais benefícios oferecidos por este método, tal como os baixos intervalos de temperatura necessários, os quais não ultrapassam os 3°C, o tempo de teste relativamente curto, variando em torno de 120 segundos, além da facilidade na detecção de erros. Porém, devem ser observados alguns fatores que influenciam diretamente no valor da propriedade condutividade térmica obtido. A convecção e a radiação são fatores que influenciam diretamente nos valores de condutividade térmica medidos, devendo ser levados em consideração, bem como o diâmetro da célula que contém a amostra, que deve ser caracterizado como infinito, quando comparado ao diâmetro e comprimento de sonda.

A geometria cilíndrica da amostra parece ser a mais adequada, sendo amplamente testada e aprovada por Blackwell (1956).

O tempo do experimento não deve ultrapassar os 120 segundos (Corrêa & Freire, 1987), para que os fenômenos da convecção e da radiação, bem como a interferência da umidade ambiente, sejam amenizados.

As sondas construídas por Pietrobon, (1988), foram projetadas de acordo com as técnicas de Blackwell (1953, 1954, 1956).

2.3.3.1 Cálculo da Condutividade Térmica em Regime Transiente

As medidas de condutividade térmica com sondas lineares supõem uma fonte linear contínua de calor num meio isotrópico, infinito (quando comparado com as dimensões da sonda) e homogêneo.

Holman (1982), escreve a equação geral da transferência de calor como a seguir:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

onde:

T é a temperatura

t é o tempo

α é a difusividade térmica (função da condutividade térmica)

Carslaw & Jaeger (1949), apresentam a solução analítica da condutividade térmica para o regime transiente, função do tempo (t), da temperatura (T) e do calor transferido (q), conforme a equação que segue:

$$k = \frac{q}{4 \pi} \frac{d \text{Ln}(t)}{d \Delta T} \quad (2.8)$$

As medidas fornecidas pela sonda, relaciona cada intervalo de tempo Δt [seg.] a uma diferença de temperatura ΔT , medida em [mV], convertida para [°C] através de tabela de conversão apropriada.

Plotando-se a curva ΔT em função de $\frac{\text{Ln}(t_2)}{\text{Ln}(t_1)}$, obtém-se uma porção linear onde o coeficiente angular é representado por $\theta = \frac{q}{4 \pi k}$.

Porém, Blackwell (1953), verificou que a solução analítica não levava em consideração as características da sonda e desenvolveu uma equação que apresentasse estas características, escrevendo-a da seguinte forma:

$$K = \frac{V^2}{\theta 4 \pi R L} \quad (2.9)$$

onde:

$\frac{V^2}{R L}$ representa o modelo físico para a transferência de calor por condução.

sendo:

K a condutividade térmica efetiva [W/m.°C]

L o comprimento de sonda [m]

R a resistência da sonda [ohms]

V a tensão aplicada à sonda [volts]

Pietrobon (1988), faz uma descrição sucinta do projeto de algumas sondas lineares, desde Van Der Held & Van Drunen (1949), e apresentam as sondas construídas em sua pesquisa, duas das quais foram utilizadas neste trabalho. Tye (1969) descreve com detalhes as técnicas de medidas empregadas neste regime.

2.4 Umidade

A umidade do material sólido é o principal fator que governa a qualidade do produto armazenado Puzzi (1975), sendo de grande importância também

sob o ponto de vista comercial; a quantidade de água contida no material sólido pode alterar substancialmente o valor do produto negociável.

Parte da água retida é considerada como sendo adsorvida devido à propriedade de aderir à superfície sólida. Outra parte da água é absorvida por forças capilares nos micro-interstícios do material sólido. E ainda outra parte da água compõe a estrutura celular, sendo quimicamente presa à matéria seca, Puzzi (1975).

Para fins práticos pode ser estabelecido a presença de água em um corpo sólido, de duas formas: água livre e outra fortemente retida. A Figura 2.4 apresenta a composição de água e matéria seca de um corpo sólido.

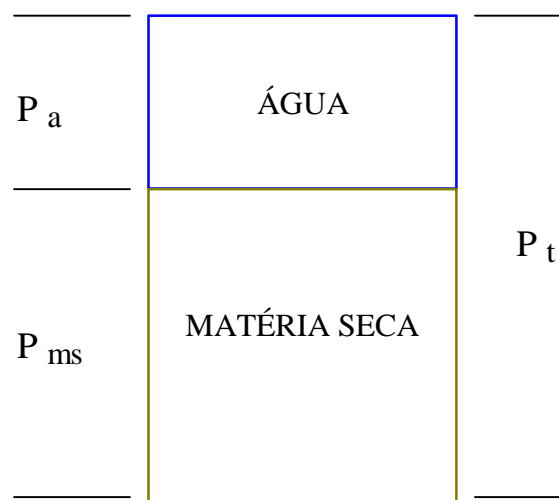


Figura 2.4 Composição água - matéria seca de um corpo sólido

onde:

P_a é o peso da água

P_{ms} é o peso da matéria seca

P_t é o peso total do produto

O teor de umidade pode ser expresso de duas maneiras:

$$\% \text{ base seca} = \frac{P_a}{P_{ms}} 100 \quad (2.10)$$

$$\% \text{ base úmida} = \frac{P_a}{P_t} 100 \quad (2.11)$$

Para o produtor, o armazenista ou o comerciante, interessa o teor expresso em base úmida.

Para a determinação do teor de umidade existem alguns métodos distintos dentre os quais pode-se evidenciar o método de estufa, o método através de destilação e o método utilizando infravermelho.

2.4.1 Equações para a Determinação da Umidade

A umidade da gelatina é determinada segundo a Norma BSI 1957-1975, descrita em documento interno da Leiner, a qual especifica, a temperatura e o tempo que a amostra deve permanecer dentro da estufa. Puzzi (1975), afirma que se tais parâmetros não forem compatíveis com o material de teste, os resultados podem apresentar erros da ordem de até 2%, caracterizando uma diferença muito grande em termos de ordem de grandeza fornecendo um teor de umidade errôneo.

Para os cálculos de umidade utiliza-se a equação abaixo, retirada da Norma acima.

$$\% \text{ de umidade (base úmida)} = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_A} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

onde

P_1 peso do cadinho + peso da amostra

P_2 peso do cadinho + peso da amostra após estufa

P_A peso do cadinho + peso da amostra - peso do cadinho

O método Leiner somente se diferencia do método estufa, quando a gelatina se encontra com umidade inferior a 30% (base úmida), devendo a amostra ser intumescida, por uma hora, antes de ser colocada em estufa.

2.5 O Modelo Matemático da Secagem de Gelatina

Neitzel & Massarani (1987) iniciaram estudos para a modelagem do secador industrial da Leiner- Maringá, considerando o leito de gelatina como sendo um meio poroso e homogêneo, utilizando as medidas de secagem em batelada, realizadas por Bertoli & Neitzel (1987) e verificaram que as equações utilizadas para modelar a cinética da secagem deveriam ser aprimoradas para descrever com mais fidelidade a fase com velocidade decrescente de secagem. Silva (1995) simulou o mesmo secador, adotando estratégias como a de limitar o passo de avanço no tempo obtendo resultados

satisfatórios; porém ainda sugere aperfeiçoamentos do modelo, como pode ser verificado nas sugestões em seu trabalho.

Na fase de velocidade decrescente Silva (1995) verificou que ocorrem gradientes de temperatura no interior da gelatina cuja intensidade depende da grandeza condutividade térmica. Tendo em vista a não apresentação desta grandeza pela literatura Silva (1995) utilizou em seu trabalho a condutividade térmica da água, adotando-a como constante em todo o percurso da secagem.

A substituição da equação da condutividade térmica em função da umidade no modelo matemático de Silva (1995) acarreta sérias alterações, pois as equações de transferência de massa e energia devem ser analisadas simultaneamente, e para o secador industrial deve-se ainda considerar além do fluxo de ar perpendicular ao leito de gelatina, o fluxo paralelo ao leito.

O modelo matemático descrito por Silva (1995) é apresentado no Anexo 8.1.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste ítem serão apresentados o material e os métodos utilizados na obtenção experimental da condutividade térmica da gelatina e dos teores de umidade, bem como o equipamento construído.

Foram utilizados três equipamentos distintos, sendo dois em regime permanente e um em regime transiente, para se determinar a curva de tendência de variação da condutividade térmica da gelatina.

3.1 A Matéria-prima

O material utilizado no estudo é constituído de amostras de gelatina, “in natura”, fornecidas pela LEINER GELATINAS DO BRASIL Ltda. As amostras foram retiradas das oito câmaras que compõem o secador contínuo de esteira e do extrusor que o alimenta.

A gelatina apresenta comportamentos peculiares devido às suas propriedades físico-químicas, e dentre estas propriedades são importantes para o desenvolvimento de nossa pesquisa, as propriedades que se apresentam abaixo:

- solubilidade, que é a capacidade que a gelatina tem de se dissolver facilmente na presença de água, ácido acético e soluções aquosas de álcoois polidroxí tais como: glicerol, sorbitol e manitol.

- estabilidade - a gelatina pode ser decomposta a temperaturas superiores a 100° C e as soluções aquosas ou gel de gelatinas são muito suscetíveis à ação de bactérias.

Desta forma, nos prevenindo de interferências externas, os “noodles” foram coletados do secador industrial no dia da realização das medidas de umidade e condutividade térmica, na tentativa de preservar-se as características do produto.

A coleta foi realizada em sacos plásticos esterilizados os quais foram transferidos da indústria até o laboratório de Processos de Separação do Departamento de Engenharia Química da UEM, em caixa de material isolante.

Os “noodles” industriais apresentam-se normalmente com 3,0 mm de diâmetro e 300,0 mm de comprimento ao saírem pelo extrusor, sendo que seu diâmetro vai diminuindo gradativamente à medida que vão perdendo umidade, isto é ocorrendo uma contração de volume.

Antes de alimentarem a célula de medida de condutividade térmica, sofrem uma diminuição de tamanho, ficando com aproximadamente 2,0 mm de comprimento, para que o leito seja o mais homogêneo e compactado possível.

3.2 Termopares

Os termopares foram especificamente confeccionados para serem utilizados nos dois sistemas de medida de condutividade térmica.

Para a confecção dos termopares foi empregada atmosfera inerte de Argônio, com eletrodos de Tungstênio para soldar fios finos de Cobre - Constantan, com diâmetro de 0,018 mm e comprimento de 1500 mm, obtendo-se termopares de cabeça diminuta, necessárias à adequação do sistema.

Após o exame da solda, em microscópio apropriado, aferiu-se cada termopar nas temperaturas de 0°C, 15°C, 25°C, 30°C e 50°C, tomando como padrão de referência um termopar Cobre- Constantan.

Para o primeiro equipamento em regime permanente foram confeccionados e aferidos 16 (dezesesseis) termopares, e para o segundo equipamento também em regime permanente foram confeccionados 6 (seis) termopares.

Após serem confeccionados foram isolados em seu comprimento, com verniz apropriado e após secos, foram revestidos com capa plástica protetora.

3.3 Equipamentos de Medida da Condutividade Térmica

3.3.1 Equipamento de Placas Paralelas I

No presente trabalho, inicialmente, tomou-se por base o sistema de placas paralelas construído por Pietrobon, (1988), utilizado para a determinação da condutividade térmica de líquidos, ou géis na forma líquida.

O equipamento de Pietrobon consiste de duas placas quadradas de vidro, previamente aferidas com padrão de quartzo, medindo 260 x 260 x 10 mm, utilizadas como padrões de referência, onde se encontram acomodados três termopares em pequenos sulcos, feitos em cada uma das faces das placas, como pode ser constatado na Figura 3.1, perfazendo um total de doze termopares.

As placas encontram-se coladas entre si, através de dois filetes de vidro medindo 10 x 260 x 10 mm e dois filetes de vidro de 10 x 240 x 10 mm, alojados nas bordas internas das placas de vidro, formando um vazado para conter a amostra líquida. Em duas das laterais de dois filetes de vidro, em

posições, um de frente para o outro, existe um furo para a injeção de amostra, alimentando o vazado, sendo que os furos são vedados após a acomodação da amostra injetada.

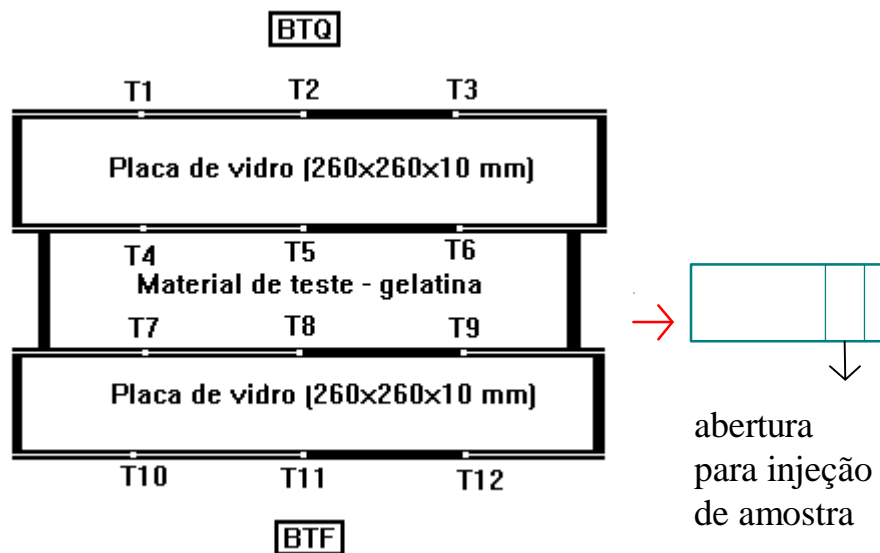


Figura 3.1 Localização dos Termopares

Para o desenvolvimento deste trabalho verificou-se a necessidade da realização de algumas modificações no sistema de Pietrobon, afim de facilitar o manuseio, e a acomodação da amostra, que agora é um meio poroso.

Em seguida são descritas as modificações do equipamento construído por Pietrobon, necessárias para a determinação da condutividade térmica da gelatina na forma viscosa e na forma seca:

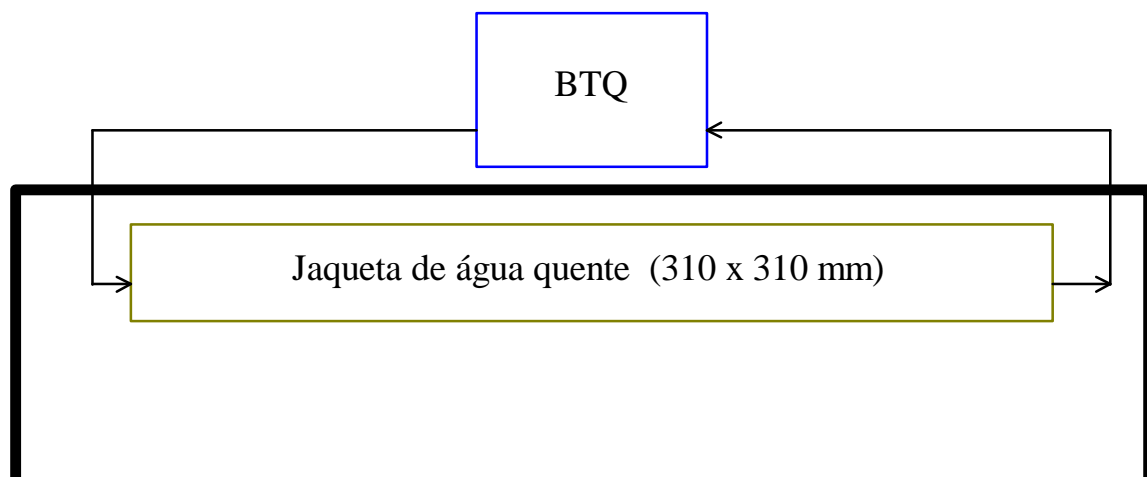
- troca dos filetes de vidro que formam o vazado da amostra, eliminando a abertura lateral, para dois filetes de vidro medindo 10 x 240 x 10 mm e dois filetes de vidro de 10 x 220 x 10 mm, diminuindo a área do vazado;
- construção de um sistema de fixação das placas padrão de vidro, às jaquetas de água quente, uma vez que a placa padrão de referência superior antes fixa, passou a ser removível;
- construção de um sistema de içamento da jaqueta de água quente, para se efetuar as trocas de amostras;

- confecção de novos termopares, com fios mais longos;
- isolamento térmico do sistema com placas de isopor para reduzir as trocas térmicas com o ambiente.

As placas são dispostas de maneira a formar um sanduiche, e ficam em contato com uma jaqueta, na parte inferior, por onde circula água à $20^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$, alimentada por um banho termostático de precisão (BTF) e em contato com outra jaqueta na parte superior por onde circula água à temperatura de $30^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$, sendo alimentada por um banho termostático de precisão (BTQ). Uma melhor visualização deste equipamento é apresentada na Figura 3.2.

Entre as jaquetas e as placas de vidro, encontra-se uma placa de cobre polida (310 x 310 x 8 mm) para minimizar o efeito de possíveis diferenças de temperatura nas fontes.

Os termopares foram agrupados a duas chaves seletoras do tipo Hartmann 111, e as leituras das temperaturas foram feitas em um indicador digital de temperaturas, modelo MD - 2000, produzido pela ECB (1988), com resolução de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ em toda sua faixa de utilização.



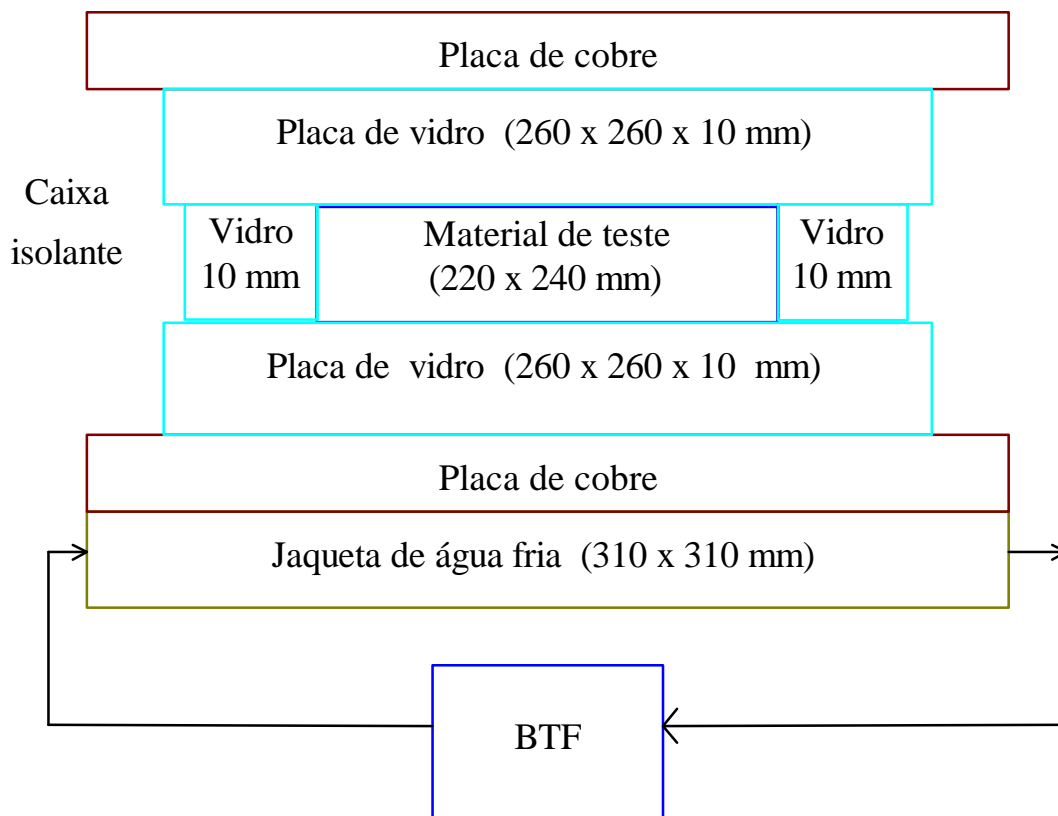


Figura 3.2 Esquema Geral do Equipamento de Placas Paralelas I - Modificado (sem escala)

A amostra de gelatina com os filamentos diminuídos de tamanho, através de moagem ou corte, era colocada no equipamento, e os vazios eram preenchidos um a um até obter-se um leito homogêneo, prosseguindo-se o experimento. Com o sistema em regime permanente, o qual ocorria em um tempo não inferior a 24 horas iniciavam-se as leituras das temperaturas que eram realizadas de 30 em 30 minutos, perfazendo um total de sete leituras.

Após efetuados os cálculos, verificou-se que o sistema não apresentou resultados aceitáveis fisicamente, pois os valores da condutividade térmica calculados eram negativos.

A partir desta constatação desenvolveu-se um sistema cuja área superficial das placas fosse bem menor que as usadas por Pietrobon (1988). Decidiu-se então construir um equipamento de funcionamento similar, porém

de dimensões bem menores e apropriado às medidas com materiais de características semelhantes às da gelatina, uma vez que o equipamento desenvolvido por Pietrobon (1988) foi projetado para medir a condutividade térmica de líquidos.

A forma geométrica das placas padrões também foram alteradas, passando de quadradas para cilíndricas, a fim de minimizar os efeitos de borda, sendo similar ao de Silveira & Freire (1983), e além disto, substituiu-se as placas de vidro por placas de acrílico, pois a ordem de grandeza de sua condutividade térmica é mais próxima da ordem de grandeza da condutividade térmica da gelatina, conhecida preliminarmente por testes realizados com o equipamento de sondas lineares.

Utilizou-se ainda de um sistema a vácuo, para manter um bom isolamento térmico da célula de medida.

3.3.2 Equipamento de Placas Paralelas II

O novo equipamento desenvolvido, cujo esboço da célula de medida é apresentado na Figura 3.3, na qual pode-se visualizar a célula composta por duas placas cilíndricas paralelas de acrílico, com diâmetro de 30,0 mm e espessura de 7,3 mm, cada uma, as quais foram previamente aferidas com as placas padrão de vidro, para serem utilizadas como padrão de referência na determinação da condutividade térmica da gelatina.

Estas placas encontram-se acopladas a duas jaquetas cilíndricas de cobre com diâmetro de 50,0 mm e altura de 80,0 mm, que são alimentadas por banhos termostáticos Mod. 521 - 3D da Ética, que através de mangueiras de diâmetro interno 5,0 mm e comprimento 2500 mm, fazem circular água quente

em uma jaqueta à temperatura de $30^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e na outra circular água fria à temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Os filamentos cilíndricos de gelatina, após sofrerem uma diminuição de tamanho, para aproximadamente 2,0 mm, eram colocados um a um dentro de um fino anel de polipropileno com 29,0 mm de diâmetro interno, com espessura também de 7,3 mm, formando um leito compacto e homogêneo. O anel com a amostra fica instalado entre as placas padrões de referência de acrílico.

Entre as jaquetas e placas padrões utilizou-se pasta térmica da Implastec, conferindo às placas de acrílico uma superfície mais lisa, para garantir a eficiência da troca térmica.

Os termopares se instalam na parte central das placas padrões de referência e da amostra conforme indicado na Figura 3.3, representado por T_1 , T_2 , T_3 , T_4 .

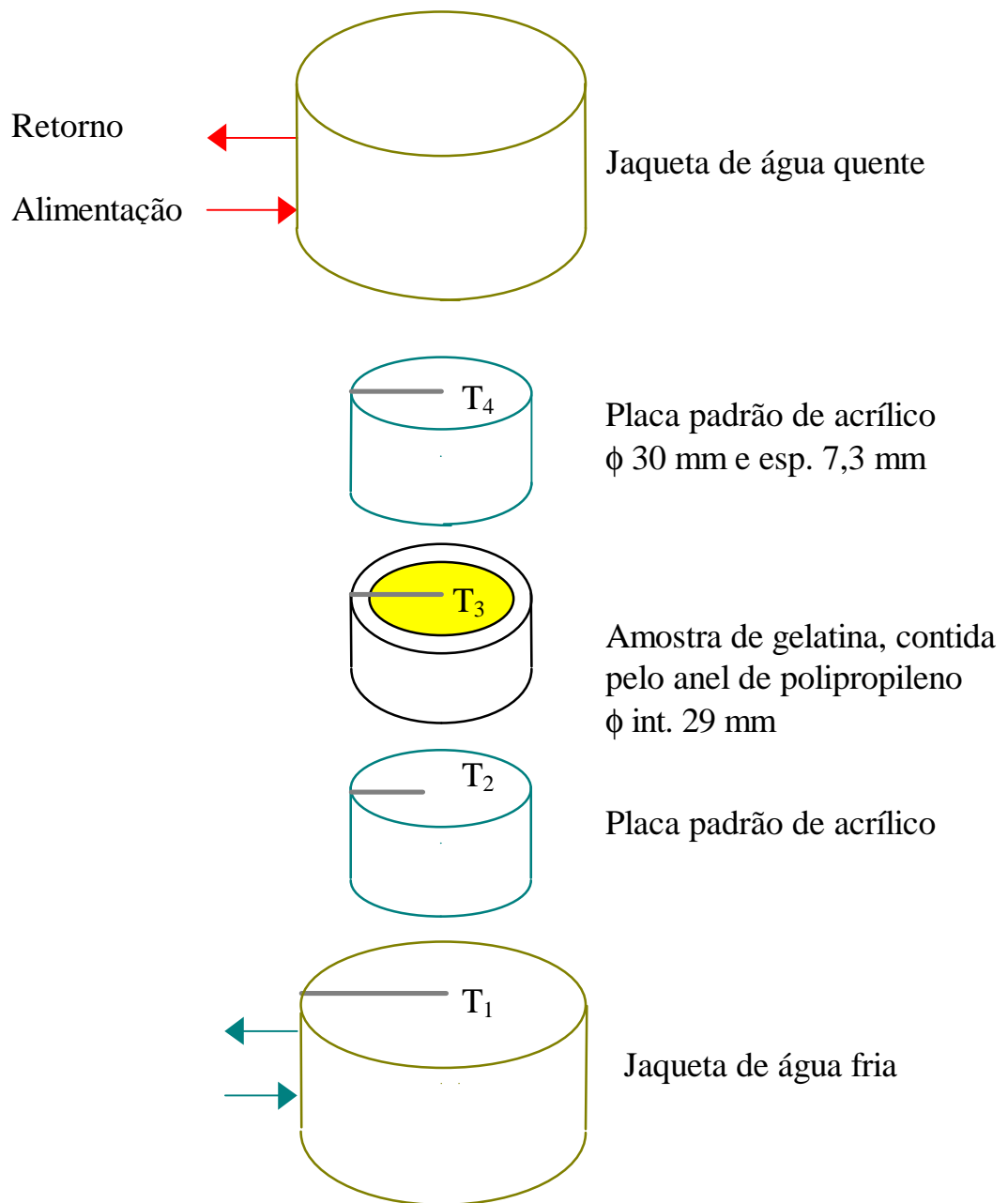


Figura 3.3 Detalhe da Célula de Medida do Equipamento II (s/escala)

A célula de medida é montada em uma câmara cilíndrica, conforme pode ser visualizada na Figura 3.4, medindo 210 mm de diâmetro e altura 340 mm, construída com placas de aço carbono com espessura de 3 mm, contendo dois visores laterais retangulares de acrílico com tamanho 108 mm x 220 mm, e com espessura de 8 mm. Uma visualização fotográfica do equipamento pode ser encontrada na Figura 8.3.1 e Figura 8.3.2.

Os visores de acrílico são suficientemente resistentes ao vácuo aplicado, que é da ordem de 500 à 680 mmHg.

Acoplados à célula de medida estão um termômetro digital (TD), uma chave seletora (CS), uma fonte controladora de tensão (FT), um manômetro de mercúrio (MM), e uma bomba à vácuo (BV).

O vácuo é aplicado ao sistema para certificar que não ocorram trocas térmicas com o meio externo à câmara de medidas.

Consegue-se a estabilização do sistema placas paralelas II em um curto período de tempo, de aproximadamente 2 horas, e após decorrido este período iniciam-se as leituras das temperaturas, através do indicador digital de temperatura MD - 2000 fabricado pela ECB (1988) o qual se encontra acoplado a um controlador de tensão Maxwell EM 800. As leituras de temperaturas realizam-se de 10 em 10 minutos, corridos, até completar 60 minutos de leitura.

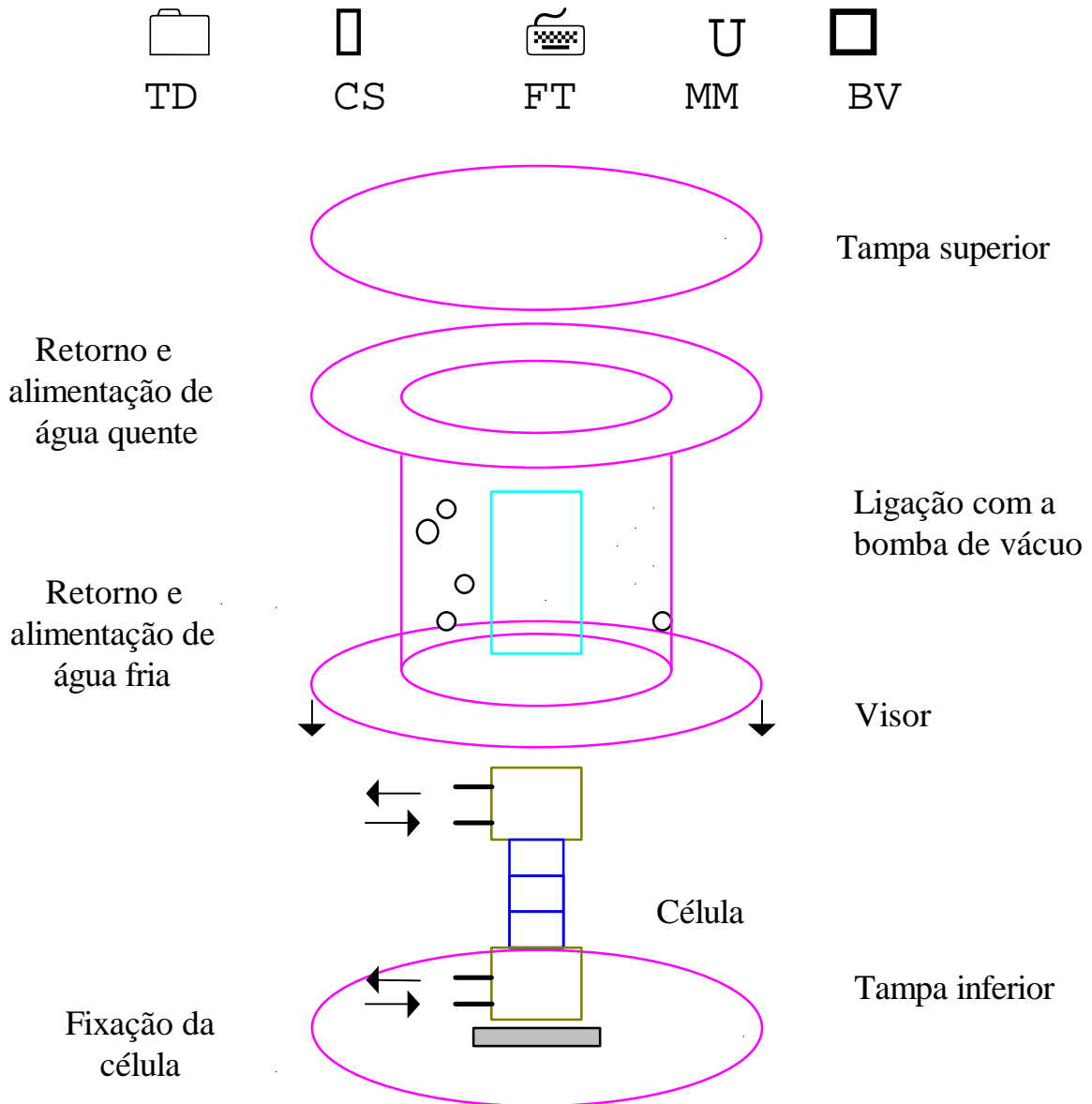


Figura 3.4 Esquema Geral do Equipamento de Placas Paralelas II

Com a condutividade térmica do polipropileno ($0,232 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$), medida pelo sistema de placas paralelas, utilizando-se as placas padrões de acrílico como referência, juntamente com os valores da área do padrão ($7,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), área da amostra ($6,61 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), as espessuras do padrão e amostra ($7,3 \times 10^{-3} \text{ m}$), substituídas na equação (2.6), obtem-se a equação (3.1).

Com as temperaturas lidas, juntamente com as condutividades térmicas do padrão superior (0,206 kcal/h.m.°C), padrão inferior (0,202 kcal/h.m.°C), determinadas no sistema de placas paralelas a partir das placas padrão de referência de vidro, calcula-se a condutividade térmica da gelatina através da equação (3.1) e que juntamente com os valores de umidade obtidos através da equação (2.12), permite-nos alocar a evolução da condutividade térmica da gelatina em função do percentual de umidade determinado para cada câmara do secador de esteira industrial da Leiner.

$$K_a = 1,3624 K_p \frac{\Delta T_p}{\Delta T_a} - 0,0161 \quad (3.1)$$

onde:

ΔT_a variação da temperatura na amostra (°C)

ΔT_p variação da temperatura no padrão (°C)

3.3.3 Sondas Lineares

Na Tabela 3.1 encontram-se apresentadas as dimensões das sondas lineares construídas por Pietrobon (1988).

Para a construção das sondas lineares, Pietrobon (1988) utilizou resistência bifilar Níquel-Cromo nº 36 AWG e termopares do tipo Cobre - Constantan que ao serem encapsulados em aço inox formam a sonda linear. Utilizou-se ainda de material isolante para formar o cabeçote da sonda construída.

Tabela 3.1 Dimensões das Sondas Lineares

	Comprimento (m)	Resistência (ohm)	Diâmetro do fio termopar (cm)
Sonda I	0,094	45,8	0,05
Sonda III	0,104	104	0,01

Como a temperatura externa tem influência direta na resistência da sonda, tomou-se o cuidado de se trabalhar sempre com a temperatura ambiente variando na faixa dos 24°C a 27°C.

Um esquema do sistema de medição de condutividade térmica, através de sondas lineares, montado especificamente para atender às necessidades deste trabalho, pode ser visualizado na Figura 3.5, bem como o detalhe da sonda.

Como a amostra deve se caracterizar como sendo infinita com relação às dimensões da sonda, utilizou-se um recipiente cilíndrico com diâmetro 30 vezes maior que o diâmetro da sonda, e de altura duas vezes maior que o comprimento de sonda.

Na fonte estabilizada empregou-se tensão de 10 Volts e corrente de 5 amperes tendo-se como referência de ponto frio, o gelo.

Ao dar partida ao sistema, ligando simultaneamente o registrador e a fonte, é traçada a curva $mV \times t$, que através de tabela apropriada obtem-se a conversão $mV \rightarrow T$, fornecendo a curva $T[^\circ C] = a + \theta \ln t[s]$.

Foram realizados testes com gelatina do extrusor, com gelatina moída da Leiner com umidades definidas; realizou-se também testes com cimento, e b gelatina em pó da Otker, para certificar-se do desempenho das sondas, já que

estes materiais encontram-se na literatura com valores de condutividade térmica, pré estabelecidos.

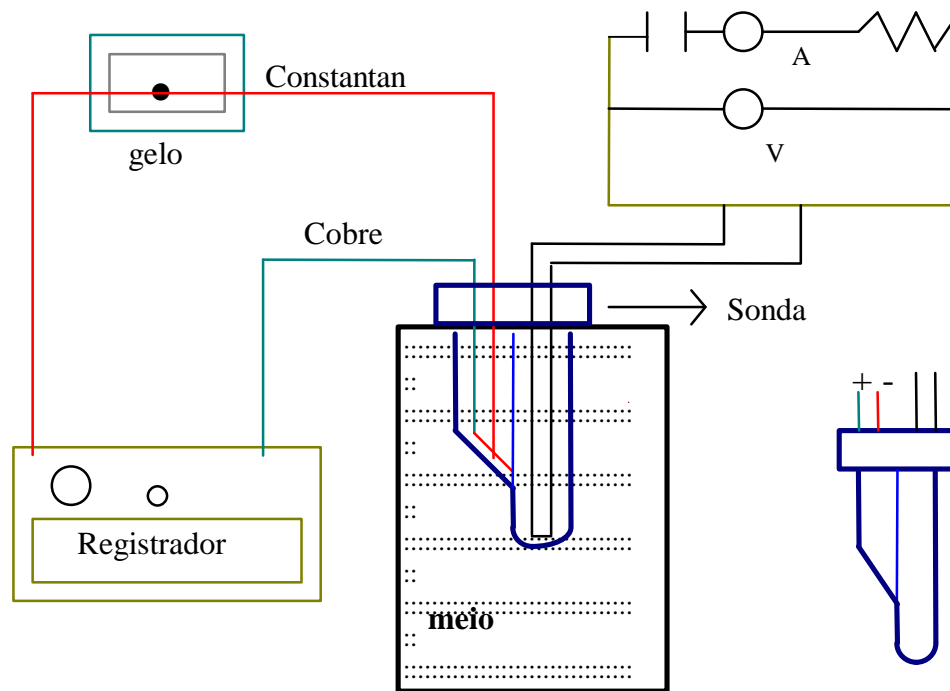


Figura 3.5 Esquema da Montagem do Sistema de Sondas
(sem escala)

Traçada a curva $T = f(\ln t)$, obtém-se o coeficiente angular da melhor porção linear, a qual é denominada θ , que quando substituída na equação (2.9) fornece o valor da condutividade térmica em $W/m^{\circ}C$.

3.4 Medidas de Umidade

As amostras retiradas do secador industrial da Leiner, para testes de condutividade, são utilizadas simultaneamente para os testes de umidade,

caracterizando-se desta maneira as amostras de gelatina por câmara de secagem.

Para a obtenção da umidade da gelatina nas várias câmaras de secagem, utilizou-se a metodologia convencional para todas as câmaras, e também a metodologia Leiner para as amostras das câmaras 2 à 7, e saída para o primeiro teste, e para o segundo teste a metodologia Leiner foi usada para as câmaras 4 à 7, e saída, por apresentarem umidade inferior a 30% base úmida.

O teste realizado com metodologia Leiner consiste em pesar-se 1(um) grama da amostra de gelatina, em cadinhos de aço-inox previamente aferidos e secos a pelo menos 3 (três) horas em temperatura $105^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$. A amostra de 1(um) grama deve ser intumescida com 10 (dez) ml de água destilada, por pelo menos 1(uma) hora antes de ser colocada em estufa sem circulação. Passado este período, coloca-se as amostras em estufa à $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por $18\text{ h} \pm 1\text{ h}$.

O método convencional da estufa consiste em pesar-se 3 gramas de gelatina e colocá-la em cadinhos previamente secos, também a pelo menos 3 (três) horas em temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$, e logo após devem ser colocadas em estufa, sem circulação pelo mesmo período e temperatura do método Leiner.

Após o tempo de secagem estipulado, retira-se as amostras da estufa em dessecador e aguarda-se o resfriamento, em torno de 15 minutos, para as novas pesagens. A umidade é então calculada utilizando-se a equação (2.12).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração dos termopares

Para a aferição dos seis termopares (TP) necessitou-se de um termopar de referência (TR) de Cobre-Constantan, padronizado, e de um termômetro padrão de mercúrio (TM), para comparação dos resultados obtidos.

As tomadas de temperaturas foram realizadas:

- à temperatura ambiente
- em um recipiente contendo gelo
- e em dois banhos termostáticos sendo um à temperatura de 25°C e outro à temperatura de 50°C.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do primeiro teste de aferição, realizado com os seis termopares confeccionados para serem utilizados no equipamento II. A Figura 4.1 apresenta uma visualização clara dos resultados obtidos.

Tabela 4.1 Aferição dos termopares à 25°C e 50°C (Temperaturas em °C)

Meios	TM	TR	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6
gelo	1,0	0,8	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
ambiente	22,0	22,8	22,8	22,7	22,6	22,7	22,6	22,5
banho 25°C	25,0	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,7	25,7
banho 50°C	49,5	49,7	49,1	49,0	49,1	49,2	49,1	49,2

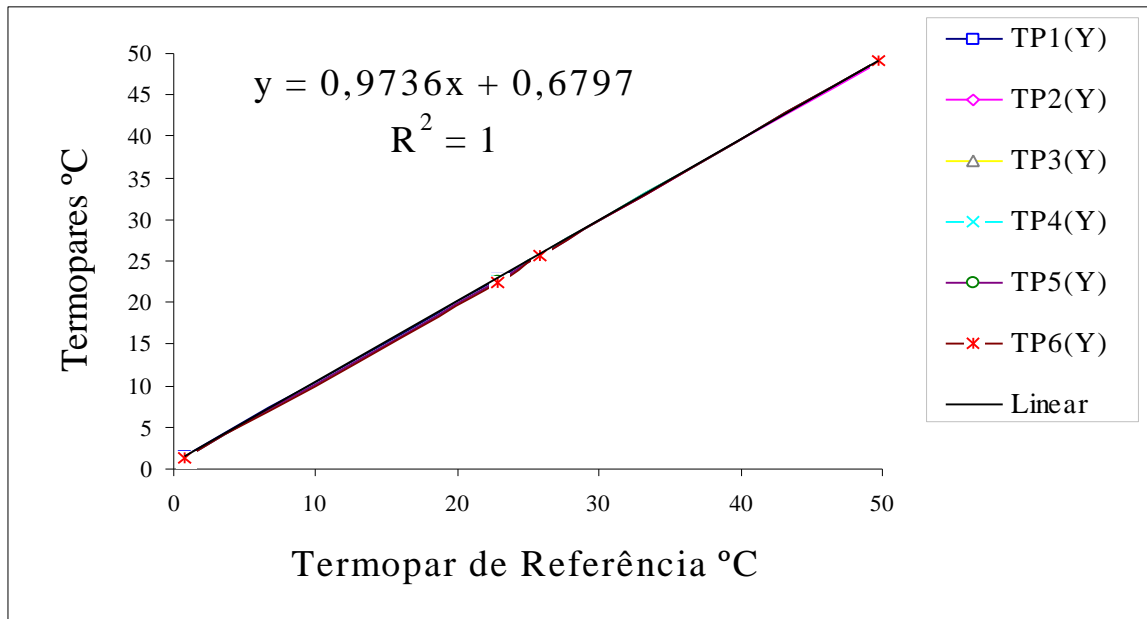


Figura 4.1 Linearização dos Termopares à 25°C e 50°C

Para um segundo teste de aferição, utilizou-se temperaturas de 15°C e 30°C, nos banhos frio e quente respectivamente, mantendo-se a temperatura do gelo e temperatura ambiente para a obtenção dos pontos de teste comparativos, conforme pode ser verificado na Tabela 4.2 e visualizado na Figura 4.2.

Tabela 4.2 Aferição dos termopares à 15°C e 30°C (Temperaturas em °C)

Meios	TM	TR	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6
gelo	1,0	1,2	1,5	1,2	1,3	1,0	1,2	1,2
banho 15°C	15,0	15,5	15,2	15,4	15,4	15,2	15,2	15,4
ambiente	26,0	24,4	24,6	24,7	24,8	25,0	24,7	24,8
banho 30°C	30,0	29,8	29,6	29,6	29,6	29,7	29,6	29,6

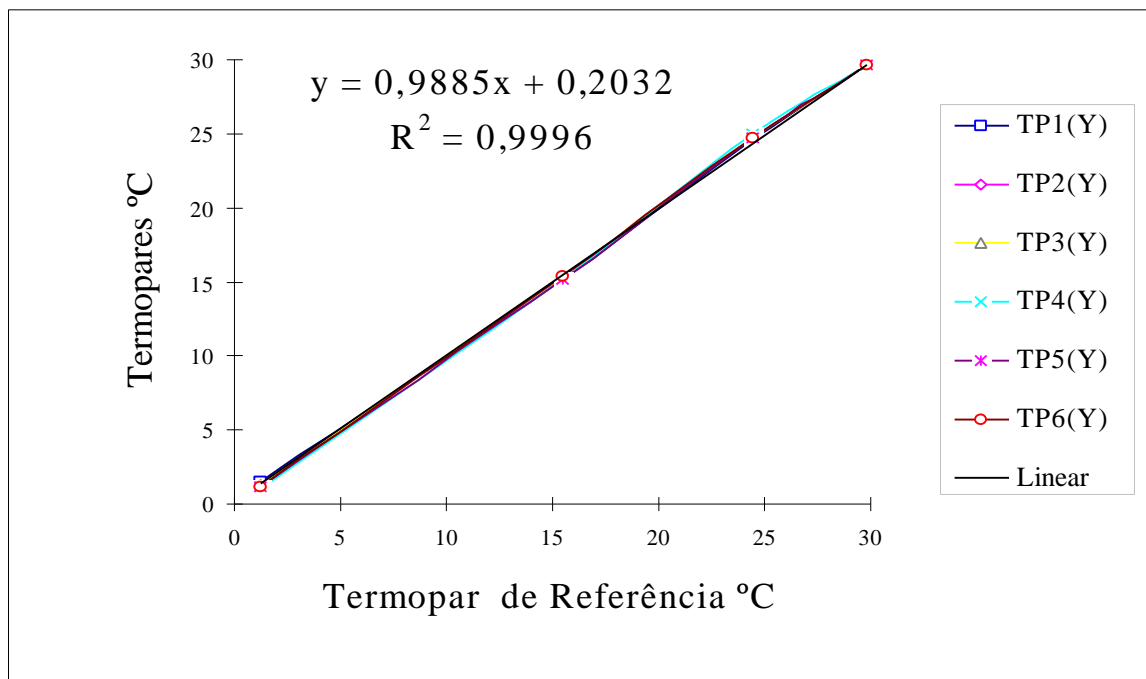


Figura 4.2 Linearização dos Termopares à 15°C e 30°C

Observando a Figura 4.1 e a Figura 4.2 verifica-se que todos os termopares testados, se comparados com o termopar padronizado de Cobre-Constantan apresentam uma resposta linear, bastante satisfatória, fazendo um ângulo de 45° com os eixos ordenados, indicando a confiabilidade de resposta dos termopares confeccionados.

4.2 Aferição dos Equipamentos

4.2.1 Comparação entre Termômetro Digital versus Milivoltímetro

Com pastilha de terra de Caiuá verificou-se as oscilações das temperaturas no equipamento através de um milivoltímetro e de um indicador digital de temperaturas.

Os resultados são apresentados na Tabela 8.2.1 e Tabela 8.2.2 podendo ser visualizados na Figura 8.2.1 e Figura 8.2.2.

Analisando a Figura 8.2.1 e a Figura 8.2.2, do Capítulo VIII, verifica-se que os dois equipamentos de medida operam de forma satisfatória face às respostas obtidas. Porém, para o milivoltímetro ocorre o inconveniente de que a cada milivoltagem lida, deve-se realizar uma interpolação em tabela apropriada para encontrar a temperatura em °C correspondente, e os erros de aproximação são acumulativos. Para o indicador digital de temperatura os erros ficam apenas por conta das aproximações das leituras da oscilação. Considerando estes fatores optou-se por utilizar o indicador digital de temperatura com resolução de 0,1 °C em todos os testes realizados.

4.2.2 Condutividade Térmica de Materiais Diversos em Regime Transiente

Foram realizados três testes com a gelatina do extrusor da Leiner, utilizando a sonda I e três testes utilizando a sonda III. A Tabela 4.3 apresenta o primeiro teste realizado com a sonda I, sendo que a Figura 4.3.1.a, apresenta todos os pontos medidos, a Figura 4.3.1.b apresenta somente os primeiros pontos e Figura 4.3.1.c mostra os últimos pontos do mesmo teste. Todos os testes foram realizados por um período de 120 segundos, cada um, e os resultados apresentaram-se satisfatórios.

Tabela 4.3 Gelatina do Extrusor - Sonda I

<i>ln t</i>	T (°C)
1,79	20,37
2,48	20,98
2,89	21,65
3,18	23,17
3,40	24,09
3,58	25,11
3,74	25,30
3,92	25,84
3,99	26,45
4,09	27,06
4,19	27,55
4,28	27,67
4,43	28,04
4,50	28,28
4,56	28,89
4,68	29,52
4,74	29,98
4,79	30,11

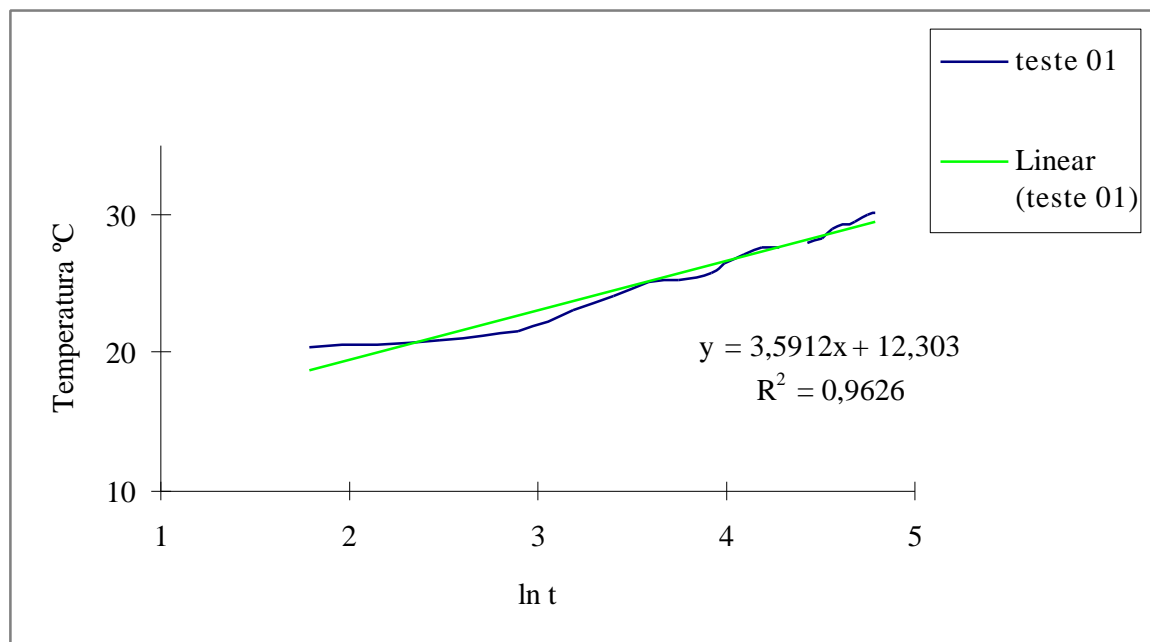


Figura 4.3.1.a Gelatina do Extrusor teste 01 Todos os Pontos - SondaI

Partindo da equação (2.9) calculou-se a condutividade térmica da gelatina do extrusor, utilizando o coeficiente angular da reta fornecida pela linearização da curva total, e obteve-se $k = 0,44 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$.

Da literatura sabe-se que quanto mais próximo do valor 1 (um), for o coeficiente de correlação em uma linearização, melhor e mais representativo será o coeficiente angular obtido. Desta forma variou-se a tomada de pontos, iniciando pelos dois extremos da Tabela 4.3 sendo representados como porções lineares na Figura 4.3.1.b e na Figura 4.3.1.c, início e término da curva geral, respectivamente.

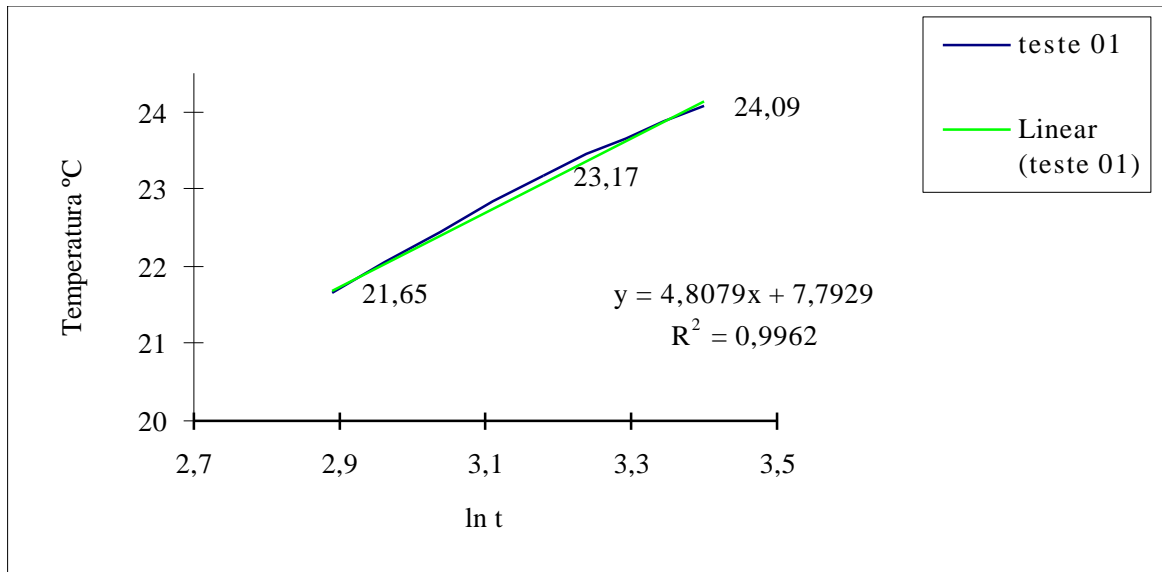


Figura 4.3.1.b Gelatina do Extrusor teste 01 Primeiros Pontos - Sonda I

Partindo da mesma equação (2.9) calculou-se a condutividade térmica da gelatina do extrusor, utilizando-se o coeficiente angular da reta fornecida pela linearização da curva, plotada com os primeiros pontos de teste, e obteve-se $k = 0,331 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$.

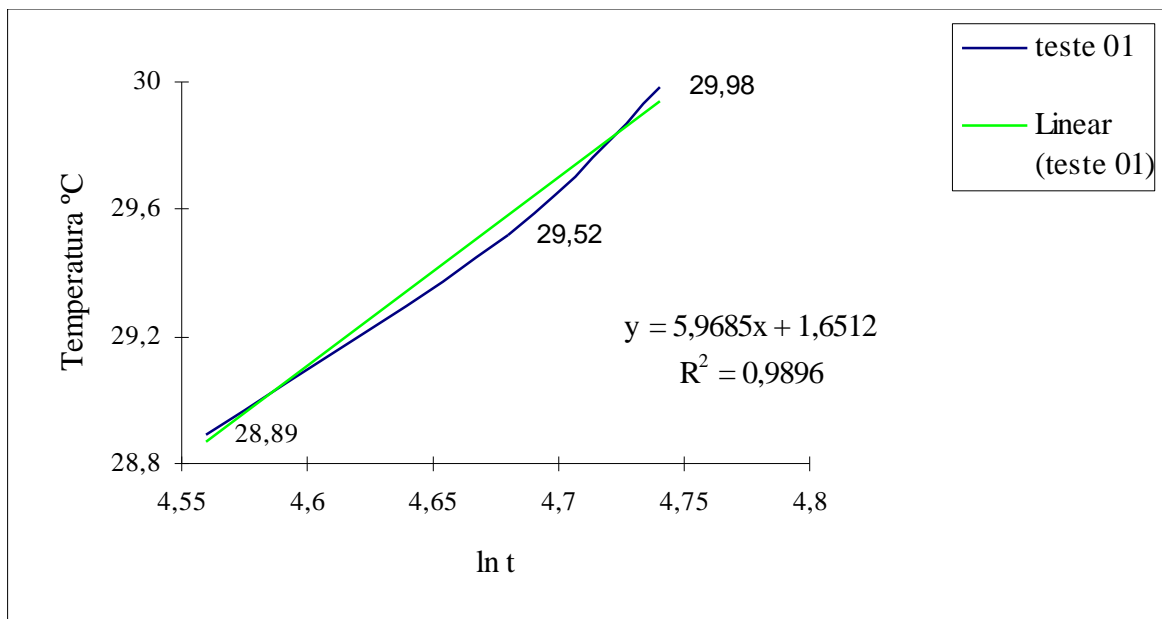


Figura 4.3.1.c Gelatina do Extrusor teste 01 Últimos Pontos - Sonda I

O mesmo procedimento de cálculo foi utilizado para os últimos pontos do teste e obteve-se a condutividade térmica $k = 0,266 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$.

Pode-se observar que para a curva obtida com todos os pontos, a linearização nos fornece um coeficiente angular, o qual nos permite obter uma condutividade térmica de $0,44 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$, que é bem próxima do valor da condutividade térmica da água a qual, para a temperatura de 25°C fica em torno de $0,52 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$, apesar do melhor coeficiente de correlação ter sido apresentado na linearização da curva dada pelos primeiros pontos, fornecendo uma condutividade térmica efetiva de $0,331 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$.

A variação dos pontos tomados parece não influenciar nos resultados obtidos de maneira a comprometê-los, uma vez que a condutividade térmica obtida, se apresenta dentro de uma faixa de variação permissível

O ideal seria localizar, na curva geral, a melhor porção linear, que abrangesse o maior número de pontos possível, cuja correlação fosse igual a 1 (um), representando uma reta perfeita, porém isto não ocorre com muita frequência e os valores encontrados caracterizam bem o produto analisado.

Para que a comparação de resultados ficasse mais confiável foram realizados mais dois testes. Os novos resultados de condutividade térmica apresentam-se bastante próximos, levando-nos a acreditar na confiabilidade do sistema de medidas. A Tabela 4.3.1 apresenta os resultados das condutividades térmicas medidas.

Tabela 4.3.1 Condutividade Térmica da Gelatina do Extrusor Sonda I

	Teste 1 (kcal/h.m.°C)	Teste 2 (kcal/h.m.°C)	Teste 3 (kcal/h.m.°C)
Todos os pontos	0,440	0,414	0,384
Primeiros pontos	0,331*	0,462	0,366*
Últimos pontos	0,266	0,361*	0,317

* são valores de K com as melhores correlações

Podemos observar pelas melhores correlações, que para o caso da Sonda I, os primeiros pontos são os que melhor representam a grandeza procurada e a média dos três testes nos fornece um valor de condutividade térmica igual a 0,353 kcal/hm°C, que após realizados os testes com placas paralelas, verificou-se que também é bastante representativo, caracterizando de forma confiável a gelatina mais úmida.

A Tabela 4.4 apresenta o primeiro teste realizado com a Sonda III, e a Figura 4.4.1.a, a Figura 4.4.1.b e Figura 4.4.1.c, complementam as informações em forma de visualização, mostrando as variações nas tomadas dos pontos para se realizar a linearização da curva, obtendo o melhor coeficiente angular da reta descrita.

Tabela 4.4 Gelatina do Extrusor - Sonda III

<i>ln t</i>	T (°C)
1,79	18,54
2,48	21,46
2,89	22,80
3,18	24,63
3,40	25,24
3,58	26,45
3,74	27,06
3,87	27,67
3,99	28,04
4,09	28,28
4,19	28,89
4,43	29,25
4,50	29,50
4,56	29,98
4,68	30,11
4,79	30,34

Ao serem comparados os resultados da Tabela 4.3 com os da Tabela 4.4, verifica-se que ocorrem variações das temperaturas lidas, da ordem de 1°C, o que de antemão nos mostra que ocorrerá uma variação dos valores obtidos para a condutividade térmica da gelatina do extrusor, uma vez que as dimensões das sondas são distintas. Esta afirmação pode ser verificada analisando-se a Figura 4.4.1.a, Figura 4.4.1.b, e Figura 4.4.1.c.

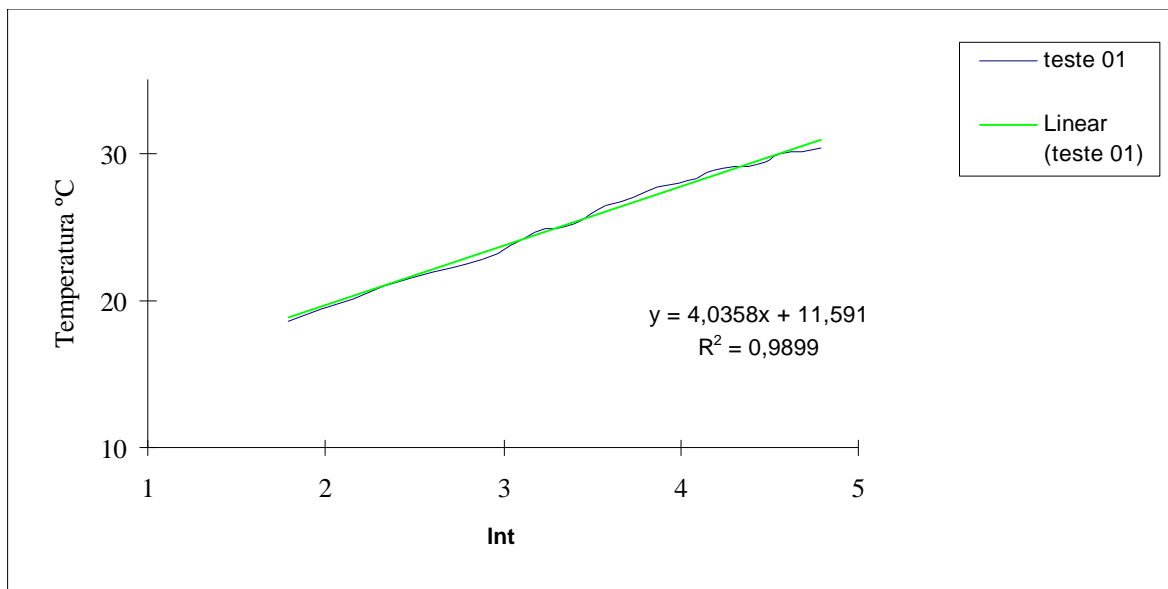


Figura 4.4.1.a Gelatina do Extrusor teste 01 Todos os Pontos - Sonda III

A curva obtida com a Sonda III, parece ser bem mais comportada que a obtida pela Sonda I, porém, realizados os cálculos para a linearização da curva geral, obteve-se $k = 0,16 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$, que é um resultado bastante inferior aos resultados obtidos anteriormente, e que fica bastante distante do valor da condutividade térmica da água.

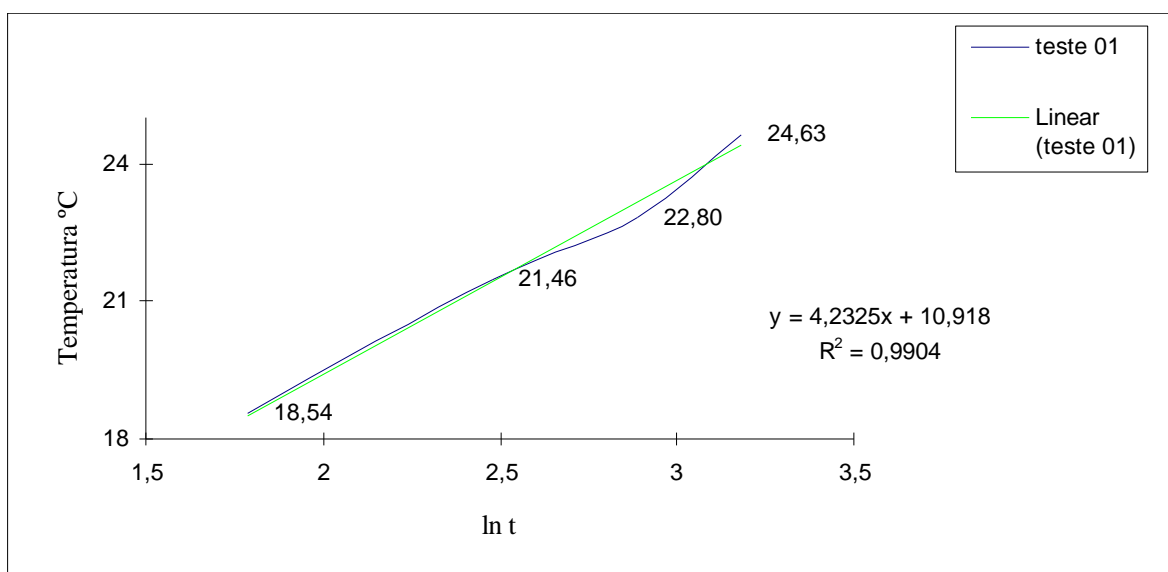


Figura 4.4.1.b Gelatina do Extrusor teste 01 Primeiros Pontos - Sonda III

Ao tomar-se os primeiros pontos da curva como uma porção linear, verifica-se que a condutividade térmica obtida apresenta-se ainda menor que a obtida com todos os pontos, cujo valor $k = 0,15 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$.

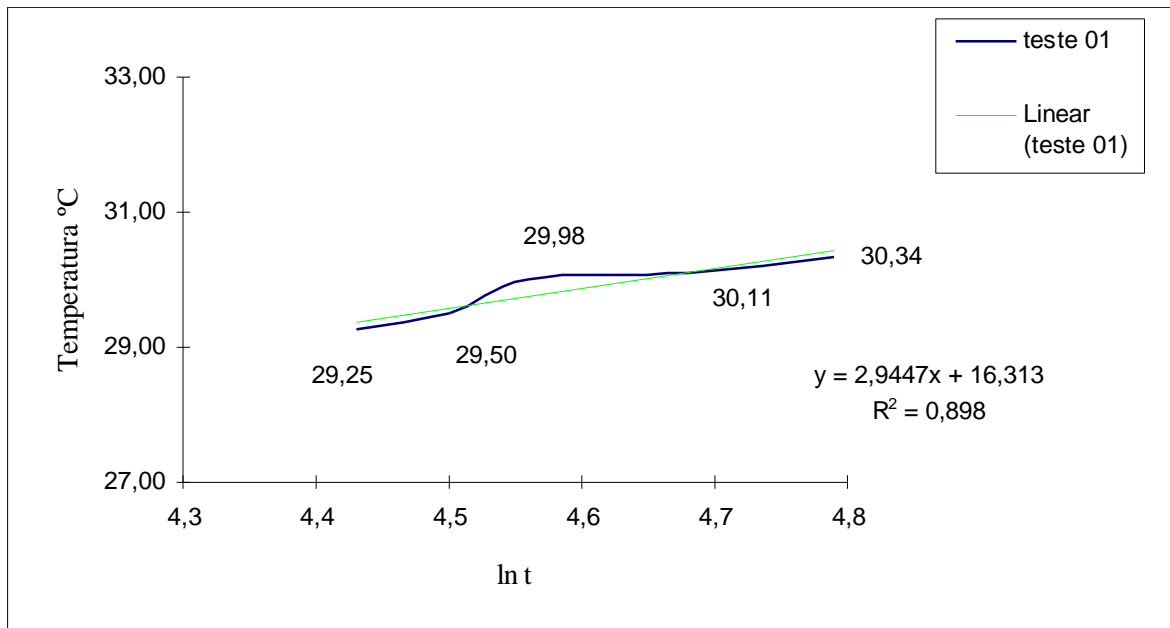


Figura 4.4.1.c Gelatina do Extrusor teste 01 Últimos Pontos - SondaIII

Para uma porção linear com os últimos pontos verifica-se um coeficiente de correlação ruim, o qual fornece uma condutividade térmica de $k = 0,216 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$.

Foram realizados ainda mais dois testes com a Sonda III, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.4.1.

Tabela 4.4.1 Condutividade Térmica da Gelatina do Extrusor Sonda III

	Teste 1 (kcal/h.m.°C)	Teste 2 (kcal/h.m.°C)	Teste 3 (kcal/h.m.°C)
Todos os pontos	0,160	0,215	0,175
Primeiros pontos	0,150	0,205	0,175
Últimos pontos	0,216	0,226	0,194

Analisados os resultados obtidos e comparados, às suposições iniciais de que a condutividade térmica da gelatina muito úmida pode ser igual a da água, que à 20°C é de 0,511 kcal/h.m.°C e à temperatura de 30°C é de 0,526 kcal/h.m.°C (Kreith, 1977), verificou-se que a Sonda I fornece resultados melhores e mais aceitáveis. Sendo assim, abandonou-se os resultados obtidos pela sonda III, mantendo as afirmativas de Pietrobon (1988), de que a Sonda do tipo I é a mais apropriada para medidas de condutividade térmica de gelatina e meios porosos, sendo a Sonda III mais apropriada para ser utilizada em meios líquidos.

Para que a confiabilidade destes resultados prevaleça, foram realizadas ainda medidas de condutividade térmica para diversos materiais granulares, utilizando a Sonda I.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados para estes materiais.

Tabela 4.5 Condutividade Térmica em Regime Transiente para Alguns Sólidos Granulares.

	Cimento	Gelatina em pó Otker	Gelatina do extrusor Sonda I	Gelatina moída da Leiner
Condutividade k	0,096	0,159	0,366	0,103
(kcal/h.m.°C)	à 0,123	à 0,185	à 0,462	à 0,110
Umidade %	15	14	70	14
(base úmida)				

Para o cimento foi obtido um valor bem superior ao fornecido pela literatura. Este fato nos leva a crer que as características dos dois cimentos são bastante diferentes, e a literatura não nos fornece estas características. As comparações se efetuam somente com os valores obtidos com o nosso equipamento de placas paralelas.

Em seguida após realizadas as medidas da condutividade térmica no equipamento de placas paralelas, pode-se realizar as devidas comparações, verificando também suas variações com a umidade.

4.2.3 Condutividade Térmica de Materiais Diversos em Regime Permanente - Equipamento II

4.2.3.1 Condutividade térmica do acrílico

A Tabela 4.6 apresenta as temperaturas médias lidas no termômetro digital no teste realizado com duas placas de acrílico de diâmetro 30,0 mm e

espessura 7,3 mm, utilizando placas cilíndricas de vidro como padrão de referência, cuja condutividade térmica é igual a 0,9183 Kcal/h.m.°C, com diâmetro igual ao da placa de acrílico, porém com espessura de 10 mm.

Tabela 4.6 Temperaturas médias Placa de acrílicoI

Tempo (min)	T1 °C	T2 °C	T2-T3 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,15	20,50	7,65	28,15	29,90
10	19,15	20,75	7,55	28,30	30,05
20	19,00	20,80	7,75	28,55	30,20
30	19,15	20,95	7,70	28,65	30,25
40	19,00	20,95	7,70	28,65	30,30

Partindo da Tabela 4.6 e utilizando a equação (2.6) determina-se os valores das condutividades térmicas do acrílico apresentados na Tabela 4.6.1, onde K_a é a condutividade térmica relacionada ao padrão superior, e K'_a relaciona-se com o padrão inferior.

Tabela 4.6.1 Condutividade Efetiva Média Placa de Acrílico I

Tempo (min)	K_a kcal/hm°C	K'_a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,210	0,162	4,48	20,20
10	0,213	0,195	5,97	3,94
20	0,196	0,213	2,49	4,93
30	0,191	0,215	4,98	5,91
40	0,197	0,233	1,99	14,78
Média	0,201	0,203		

Verificando os resultados apresentados na Tabela 4.6.1, obtivemos para primeira placa de acrílico a média total das condutividades térmicas igual a 0,202 kcal/h.m.°C.

As temperaturas médias obtidas para o teste da segunda placa de acrílico se encontram disponíveis na Tabela 4.7, na qual podemos também verificar o regime permanente durante as leituras.

Tabela 4.7 Temperaturas Médias Placa de Acrílico II

Tempo (min)	T1 °C	T2 °C	T2-T3 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,15	20,80	7,70	28,50	30,20
10	19,05	20,80	7,70	28,50	30,30
20	19,10	20,80	7,60	28,40	30,15
30	19,20	20,80	7,65	28,45	30,25

Os resultados da segunda placa de acrílico são apresentados na Tabela 4.7.1, nos permitindo verificar a baixa variação dos valores da condutividade térmica entre as duas placas de acrílico testadas.

Tabela 4.7.1 Condutividade Efetiva Média Placa de Acrílico II

Tempo (min)	Ka Kcal/hm°C	K'a Kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,203	0,197	3,79	1,99
10	0,215	0,209	1,90	3,98
20	0,211	0,205	0,00	1,99
30	0,216	0,192	2,37	4,48
Média	0,211	0,201		

O resultado final da média das condutividades térmicas obtido para a segunda placa de acrílico é de 0,206 kcal/hm°C.

A Tabela 4.9 apresenta o resultado de testes realizados com diversos materiais, utilizando-se de placas de vidro como padrão de referência, para dar-se continuidade às avaliações da performance do equipamento e também aferí-lo confiavelmente.

4.2.3.2 Condutividade Térmica do Polipropileno (Tecnil)

A Tabela 4.8 apresenta as temperaturas lidas no teste com o polipropileno, as quais servirão para o cálculo da condutividade térmica deste material, que compõe a resistência equivalente, para passagem de fluxo de calor.

Tabela 4.8 Temperaturas Médias do Polipropileno

Tempo (min)	T1 °C	T2 °C	T2-T3 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,50	21,20	3,30	24,50	30,15
10	19,50	21,20	3,30	24,50	30,25
20	19,50	21,30	3,30	24,60	30,30
30	19,55	21,30	3,30	24,60	30,25
40	19,55	21,30	3,30	24,60	30,20
50	19,55	21,40	3,20	24,60	30,20
60	19,60	21,40	3,20	24,60	30,15

Partindo das temperaturas lidas no equipamento de placas paralelas, utilizando as placas de acrílico como padrão, obtivemos a condutividade

térmica efetiva média do polipropileno, através da equação (2.6), como pode ser observado na Tabela 4.8.1.

Tabela 4.8.1 Condutividade Efetiva Média do Polipropileno

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,353	0,104	0,56	4,59
10	0,359	0,104	1,13	4,59
20	0,356	0,110	0,28	4,59
30	0,353	0,107	0,56	0,92
40	0,350	0,107	1,41	1,83
50	0,361	0,117	1,69	7,34
60	0,357	0,114	0,56	4,59
Média	0,355	0,109		

Obteve-se para o teste com a placa de polipropileno a condutividade térmica média de 0,232 kcal/hm°C

4.2.3.3 Condutividade Térmica de Diversos Materiais em Regime Permanente

A Tabela 4.9 apresenta as condutividades térmicas de materiais testados no equipamento de placas paralelas, dos quais alguns servirão para a comparação com o regime transiente. Os padrões utilizados foram as placas de vidro.

Tabela 4.9 Condutividade Térmica em Regime Permanente para Materiais Diversos

	Cimento 7,3 (mm)	Pastilha Leiner 7,3 (mm)	Gel. pó Leiner 7,3 (mm)	Gel. pó Otker 7,3 (mm)	Acrílico espessura 10 (mm)	Acrílico espessura 7,3 (mm)
Condutividade	0,088		0,210	0,328	0,157	0,202
K	à	0,226	à	à	à	à
kcal/h.m.°C	0,097		0,297	0,508	0,212	0,206
Umidade						
%	18,6	10,5	11	30	-	-
(BU)						

Verifica-se que para o cimento, obteve-se um resultado bastante próximo do valor calculado para sondas lineares. Para a gelatina em pastilha da Leiner verifica-se que a compactação não interfere muito nos valores obtidos, porém pode-se afirmar que em dias muito úmidos estes valores sofrem alterações, como é o caso do resultado apresentado pela gelatina da Otker. Comparando os resultados da Tabela 4.5 com os resultados da Tabela 4.9 os mesmos confirmam a confiabilidade do sistema de placas paralelas projetado para medir a condutividade térmica da gelatina.

As placas de acrílico com espessuras diferentes apresentam também pequenas diferenças nos valores de condutividade térmica, o que nos leva a crer que as espessuras dos padrões e amostras devem, de preferência, ser iguais.

4.3 Resultados em Regime Permanente das amostras de Gelatina

4.3.1 Condutividade Térmica da Gelatina - Equipamento I

Com o primeiro equipamento obteve-se o equilíbrio somente após um tempo muito longo, aproximadamente 24 horas, e isto levou a gelatina a se desidratar, tornando-se mais seca na superfície do leito e muito úmida na parte inferior, descaracterizando um leito homogêneo em termos de umidade da amostra.

Chegou-se a conclusão de que, sendo a amostra muito grande a inércia térmica comandou o fenômeno, distorcendo os resultados obtidos, e após várias tentativas de modificações do Equipamento I, verificamos que não era um equipamento muito apropriado para medidas de condutividade térmica da gelatina.. Sendo assim estes resultados não serão apresentados neste trabalho.

4.3.2 Condutividade Térmica da Gelatina - Equipamento II

Foram realizados dois testes distintos com amostras de gelatina retiradas de cada uma das câmaras de secagem da Leiner.

Para o primeiro teste foram abandonadas as medidas realizadas com a gelatina do extrusor, pois o equipamento de medidas apresentou vazamento.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.10 à 4.17 foram obtidos sob as seguintes condições:

Vácuo na faixa de 500 mmHg à 680 mmHg

Temperatura ambiente na faixa de 24°C à 28°C

Condutividade Térmica da placa padrão superior :0,206 kcal/hm°C

Condutividade Térmica da placa padrão inferior : 0,202 kcal/hm°C

Para cada uma das câmaras de secagem industrial da Leiner foram realizadas leituras de temperaturas às quais estão apresentadas nas Tabelas 4.10 à 4.17, a partir das quais foram obtidos os valores da condutividade térmica das amostras de gelatina apresentadas na Tabela 4.10.1 até a Tabela 4.17.1, nas quais pode-se verificar também os desvios com relação à média das condutividades térmicas obtidas.

Nas Tabelas 4.10.2 a 4.17.2, são apresentadas as umidades calculadas para cada uma das amostras de teste.

Tabela 4.10 Temperaturas Médias para a Câmara 1

Tempo (min)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,00	23,00	2,50	25,45	30,35
10	18,90	23,15	2,45	25,60	30,25
20	18,80	23,15	2,55	25,70	30,35
30	18,95	23,20	2,60	25,80	30,45
40	19,00	23,35	2,60	25,95	30,35
50	19,00	23,40	2,60	26,00	30,35

Pode-se verificar, através da coluna 3 da Tabela 4.10, que o regime se mantém praticamente estacionário.

Utilizando-se a equação 3.1, calcula-se a condutividade térmica efetiva para a gelatina, e os valores obtidos encontram-se na Tabela 4.10.1.

Tabela 4.10.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,545	0,433	4,81	5,04
10	0,517	0,461	0,58	1,10
20	0,496	0,453	4,62	0,66
30	0,486	0,434	6,54	4,82
40	0,459	0,444	11,73	2,63
50	0,453	0,450	12,88	1,32
Média	0,520	0,456		

Na Tabela 4.10.1 denomina-se Ka a condutividade térmica efetiva da gelatina referente à placa padrão de acrílico posicionada na parte superior da célula, cuja condutividade térmica é 0,206 kcal/hm°C; K'a se refere ao padrão inferior de condutividade térmica igual a 0,202 kcal/hm°C

Obteve-se para a câmara 1 a Média Total das condutividades medidas o valor de 0,488 kcal/hm°C.

Para os cálculos da umidade utilizou-se a equação 2.12 e a Tabela 4.10.2 apresenta a umidade da amostra de gelatina, para a Câmara 1.

Tabela 4.10.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	54,47
2	58,45
3	59,13
Média	57,35

Ao avaliar-se os resultados obtidos para a condutividade térmica da gelatina na primeira câmara de secagem, 0,488 kcal/h.m.°C, pode-se dizer que, se comparados aos resultados obtidos com a Sonda Linear I, 0,44 kcal/h.m.°C, para a gelatina do extrusor, os valores são bastante compatíveis, confirmando, novamente a hipótese de que a condutividade inicial, para gelatinas úmidas é bem próxima da condutividade térmica da água.

Os mesmos procedimentos são efetuados para todas as câmaras de secagem, como podem ser observados nas tabelas que seguem.

Tabela 4.11 Temperaturas Médias para a Câmara 2

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,85	23,25	2,70	25,90	30,55
10	19,85	23,25	2,75	26,00	30,45
20	19,85	23,30	2,85	26,15	30,55
30	19,85	23,30	2,90	26,20	30,43
40	19,85	23,30	3,00	26,30	30,55
50	19,80	23,25	3,05	26,30	30,50

Tabela 4.11.1 Condutividade Efetiva média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média	
			%	
0	0,476	0,337	15,25	7,26
10	0,438	0,324	6,05	3,18
20	0,417	0,317	0,97	0,96
30	0,393	0,311	4,84	0,96
40	0,381	0,300	7,75	4,46
50	0,370	0,295	10,41	6,05
Média	0,413	0,314		

Média Total das condutividades medidas - 0,364 kcal/hm°C

Tabela 4.11.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	47,15
2	48,68
3	47,99
4	57,08
5	56,44
6	51,56
Média	50,98

Para a câmara 3 o valor das temperaturas encontram-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Temperaturas Médias para a Câmara 3

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,65	23,50	3,50	27,00	30,30
10	19,55	23,50	3,50	26,95	30,20
20	19,75	23,60	3,40	27,00	30,30
30	19,70	23,65	3,40	27,05	30,35
40	19,80	23,60	3,50	27,10	30,30
50	19,75	23,60	3,50	27,10	30,05

Tabela 4.12.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,249	0,287	1,63	1,71
10	0,248	0,299	1,22	2,40
20	0,256	0,296	4,49	1,37
30	0,256	0,304	4,49	4,11
40	0,240	0,283	2,04	3,08
50	0,220	0,287	10,20	1,71
Média	0,245	0,292		

Média Total das condutividades medidas - 0,269 kcal/hm°C

Tabela 4.12.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	31,21
2	30,32
3	36,03
4	30,43
5	36,49
6	39,51
Média	34,51

Para a Câmara 4 aplicou-se uma variação no tempo das leituras de temperaturas devido a ocorrência de um pequeno vazamento, alterando o vácuo, que passou de 630 mmHg para 580 mmHg. Pode-se verificar através da Tabela 4.13 que um vazamento muito pequeno não interferiu nas temperaturas do sistema.

Tabela 4.13 Temperaturas Médias para a Câmara 4

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,35	22,8	3,70	26,50	30,30
10	19,20	22,75	3,80	26,50	30,30
20	19,35	22,75	3,75	26,50	30,25
30	19,40	22,90	3,60	26,50	30,30
35	19,20	22,90	3,60	26,50	30,30
40	19,40	22,95	3,75	26,50	30,45
45	19,40	23,00	3,75	26,70	30,65

Pode-se verificar também pela Tabela 4.13.1 que os valores de condutividade térmica ainda se mantêm bastante próximos.

Tabela 4.13.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,272	0,241	0,00	2,43
10	0,268	0,244	1,47	1,21
20	0,265	0,233	2,57	5,67
30	0,280	0,251	2,94	1,62
35	0,280	0,267	2,94	8,10
40	0,265	0,244	2,57	1,21
45	0,276	0,248	1,47	0,40
Média	0,272	0,247		

Média Total das condutividades medidas - 0,260 kcal/hm°C

Tabela 4.13.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	31,03
2	31,09
3	31,78
4	29,41
5	29,89
6	30,15
Média	30,56

Pode-se verificar que a condutividade térmica da gelatina vai decrescendo, à medida que a umidade também diminui, confirmando a teoria, e já começa a apresentar a tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina com a umidade.

Tabela 4.14 Temperaturas Médias para a Câmara 5

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,10	22,60	3,85	26,45	30,60
10	19,10	22,60	3,85	26,45	30,60
20	19,05	22,60	3,85	26,45	30,60
30	19,10	22,65	3,85	26,50	60,35
40	19,10	22,60	3,90	26,50	30,60
50	19,10	22,65	3,90	26,55	30,45
60	19,10	22,70	3,80	26,50	30,35

Tabela 4.14.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,283	0,234	2,54	0,85
10	0,286	0,234	3,62	0,85
20	0,286	0,238	3,62	0,85
30	0,286	0,238	3,62	0,85
40	0,279	0,231	1,09	2,12
50	0,265	0,234	3,99	0,85
60	0,268	0,245	2,90	3,81
Média	0,276	0,236		

Média Total das condutividades medidas - 0,256 kcal/hm°C

Tabela 4.14.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	23,40
2	24,35
3	22,07
4	24,09
5	21,77
Média	23,26

Tabela 4.15 Temperaturas Médias para a Câmara 6

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,65	23,50	3,50	27,00	30,30
10	19,55	23,50	3,50	26,95	30,20
20	19,75	23,60	3,40	27,00	30,30
30	19,7	23,65	3,40	27,05	30,35
40	19,8	23,60	3,50	27,10	30,30
50	19,75	23,60	3,50	27,10	30,05
60	19,60	23,65	3,45	27,10	30,35

Tabela 4.15.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média	
			%	
0	0,249	0,287	1,22	2,38
10	0,248	0,299	0,81	1,70
20	0,256	0,296	4,07	0,68
30	0,256	0,304	4,07	3,40
40	0,240	0,283	2,44	3,74
50	0,220	0,287	10,57	2,38
60	0,248	0,307	0,81	4,42
Média	0,246	0,294		

Média Total das condutividades medidas - 0,270 kcal/hm°C

Tabela 4.15.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	13,66
2	13,16
3	13,56
4	13,12
5	13,42
6	13,12
Média	13,34

Tabela 4.16 Temperaturas Médias para a Câmara 7

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,00	21,80	4,55	26,35	30,45
10	19,00	21,80	4,60	26,40	30,50
20	18,95	21,80	4,60	26,40	30,25
30	19,00	21,85	4,60	26,45	30,45
40	18,95	21,80	4,65	26,45	30,45
50	19,95	21,90	4,60	26,50	30,55
60	19,00	21,80	4,70	26,50	30,40

Tabela 4.16.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,237	0,153	4,41	0,00
10	0,234	0,151	3,08	1,31
20	0,219	0,154	3,52	0,65
30	0,228	0,154	0,44	0,65
40	0,225	0,153	0,88	0,00
50	0,231	0,160	1,76	4,58
60	0,217	0,148	4,41	3,27
Média	0,227	0,153		

Média Total das condutividades medidas - 0,190 kcal/hm°C

Tabela 4.16.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	12,02
2	12,43
3	11,98
4	12,27
5	12,20
6	12,10
Média	12,17

Tabela 4.17 Temperaturas Médias para a Saída

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	18,85	21,70	4,85	26,55	30,35
10	18,80	21,80	4,80	26,60	30,40
20	18,90	21,80	4,80	26,60	30,20
30	18,90	21,80	4,80	26,60	30,50
40	18,90	21,80	4,90	26,70	30,45
50	18,90	21,80	4,95	26,75	29,95
60	18,85	21,90	4,80	26,70	30,20

Tabela 4.17.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média	
			%	
0	0,204	0,146	4,08	2,67
10	0,206	0,156	5,10	4,00
20	0,194	0,150	1,02	0,00
30	0,212	0,150	8,16	0,00
40	0,199	0,147	1,53	2,00
50	0,165	0,145	15,82	3,33
60	0,189	0,159	3,57	6,00
Média	0,196	0,150		

Média Total das condutividades medidas - 0,173 kcal/hm°C

Tabela 4.17.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	10,52
2	11,05
3	10,71
4	10,62
5	10,54
6	10,62
Média	10,67

As Tabelas anteriores apresentam os desvios com relação à média, dentro da faixa de aceitação teórica que é em torno de 17%. Os valores que se apresentaram maiores foram excluídos dos testes.

Os desvios médios foram calculados através da equação (4.1)

$$\text{desvio medio} = \left| \frac{\text{valor} - \text{media}}{\text{media}} \right| \quad (4.1)$$

A Tabela 4.18 é o resumo dos resultados finais apresentados nas Tabelas 4.10.1 à 4.17.1 obtidos no Equipamento de Placas Paralelas II.

**Tabela 4.18 Umidade (g_{ag} / g gel úmido) X
Condutividade (kcal/hm°C)**

Câmara	Umidade	Condutividade
1	0,574	0,488
2	0,510	0,364
3	0,345	0,269
4	0,306	0,260
5	0,233	0,256
6	0,133	0,270
7	0,122	0,190
Saída	0,107	0,173

A partir da Tabela 4.18 aloca-se a curva de evolução da condutividade térmica da gelatina com a umidade e podendo ainda ser realizada a linearização da curva obtida a qual apresenta-se na Figura 4.5, e mostra a

tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina com sua umidade correspondente. Assumindo uma umidade igual a 1 (um), na equação obtida, a condutividade térmica da gelatina assume um valor igual a 0,6485 kcal/h.m.°C, que comparado ao valor médio da condutividade térmica da água 0,519 kcal/h.m.°C, apresenta-se razoavelmente próximo, confirmando a tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina.

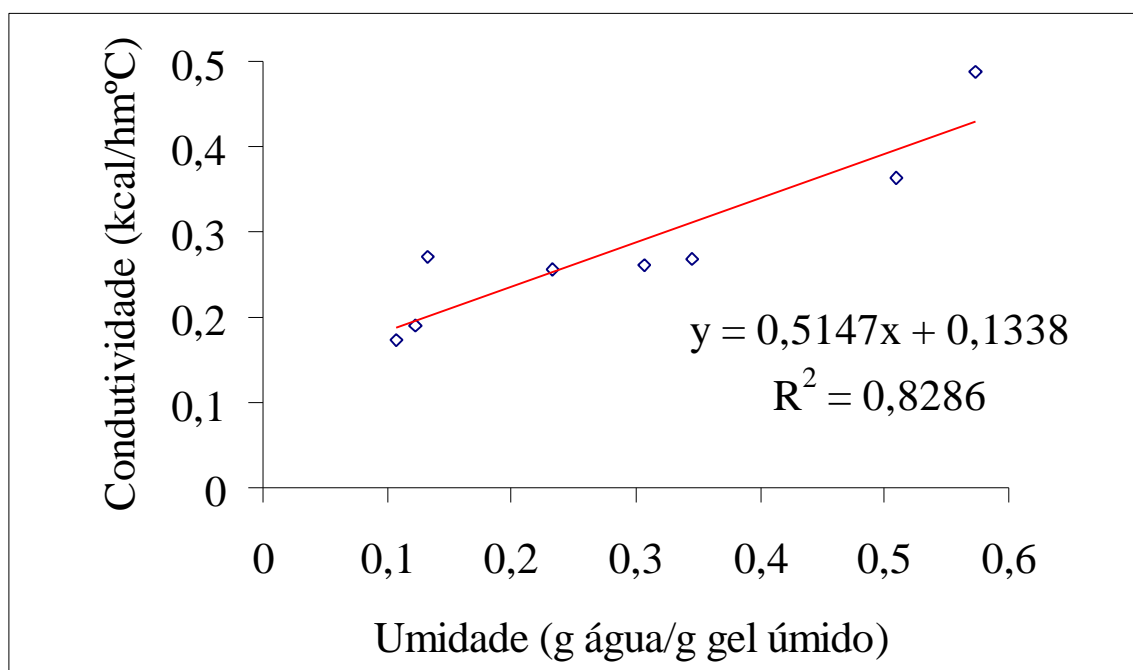


Figura 4.5 Evolução da Condutividade Térmica Efetiva da Gelatina com a Umidade

Observado o coeficiente de correlação verifica-se que a linearização não se apresenta muito bem definida, isto já evidenciado pela dispersão dos pontos apresentados. Neste caso poder-se ía optar por duas retas, uma agrupando os primeiros pontos, outra agrupando os últimos pontos, podendo o ponto de interseção ser tomado como um ponto médio constante e diferente da condutividade térmica da água para ser utilizado em modelagens matemáticas.

Pode-se salientar também que, mais importante que os pontos obtidos, é a forma da curva apresentada, mostrando a tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina, sendo amplamente aplicada à simulação da modelagem matemática.

O segundo teste foi realizado com amostras retiradas das câmaras de secagem, e também da saída do extrusor e da entrada do secador, e os resultados estão nas Tabelas 4.19 à 4.28. Os testes que seguem foram realizados nas mesmas condições gerais dos testes anteriores.

Tabela 4.19 Temperaturas Médias para a Saída do Extrusor

Tempo (min)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,10	23,15	2,50	25,65	30,50
10	19,10	23,10	2,60	25,70	30,65
20	19,10	23,10	2,55	25,65	30,65
30	19,10	23,15	2,55	25,70	30,50
40	19,05	23,15	2,60	25,75	30,45
50	19,05	23,15	2,60	25,75	30,70
60	19,10	23,15	2,60	25,75	30,60

Tabela 4.19.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,528	0,430	2,52	2,87
10	0,518	0,407	0,58	2,63
20	0,501	0,416	2,72	0,48
30	0,512	0,421	0,58	0,72
40	0,491	0,418	4,66	0,00
50	0,518	0,418	0,58	0,00
60	0,507	0,413	1,55	1,20
Média	0,515	0,418		

Média Total das condutividades medidas - 0,467 kcal/hm°C

Tabela 4.19.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	72,14
2	72,10
3	72,00
Média	72,08

A saída do extrusor e a entrada do secador estão bastante próximas, não ultrapassando a distância de 3 metros

A Tabela 4.20 apresenta as temperaturas do teste realizado com a amostra de gelatina da entrada do secador.

Tabela 4.20 Temperaturas Médias para a Entrada do Secador

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,05	22,50	2,70	25,20	30,30
10	19,05	22,55	2,65	25,20	30,80
20	18,95	22,50	2,70	25,20	30,75
30	19,00	22,60	2,60	25,20	30,85
40	19,10	22,55	2,70	25,25	30,90
50	19,25	22,55	2,70	25,25	30,75
60	19,50	22,60	2,70	25,30	30,55

Tabela 4.20.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,514	0,336	8,38	3,45
10	0,577	0,347	2,85	0,29
20	0,561	0,346	0,00	0,57
30	0,594	0,365	5,88	4,89
40	0,571	0,336	1,78	3,45
50	0,556	0,320	0,89	8,05
60	0,530	0,346	5,53	0,57
Média	0,561	0,348		

Média Total das condutividades medidas - 0,455 kcal/hm°C

Tabela 4.20.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	71,74
2	71,97
3	71,90
Média	71,87

Tabela 4.21 Temperaturas Médias para a Câmara 1

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,10	22,10	3,40	25,50	30,75
10	19,00	22,10	3,40	25,50	30,55
20	19,00	22,10	3,40	25,50	30,50
30	18,95	22,10	3,40	25,50	30,65
40	19,10	22,10	3,40	25,50	30,70
50	19,25	22,10	3,40	25,50	30,90
60	19,00	22,10	3,40	25,50	30,90

Tabela 4.21.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,417	0,227	2,71	2,99
10	0,401	0,235	1,23	0,43
20	0,397	0,235	2,22	0,43
30	0,409	0,239	0,74	2,14
40	0,413	0,227	1,72	2,99
50	0,430	0,215	5,91	8,12
60	0,430	0,235	5,91	0,43
Média	0,406	0,234		

Média Total das condutividades medidas - 0,320 kcal/hm°C

Tabela 4.21.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	59,03
2	57,99
3	56,51
Média	57,84

A partir da Câmara 1 pode-se avaliar comparativamente os dois testes realizados, e neste caso atribui-se as diferenças de resultados dos valores de condutividade térmica efetiva, às condições de operação de secagem e às características da gelatina, pois nesta fase de segundo teste, a indústria modificou as temperaturas das câmaras de secagem, e uma das etapas de produção também sofreu modificação.

Tabela 4.22 Temperaturas Médias para a Câmara 2

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,00	21,70	3,40	25,10	30,80
10	18,90	21,70	3,40	25,10	30,55
20	18,95	21,70	3,50	25,20	30,95
30	18,95	21,70	3,40	25,10	30,55
40	19,00	21,70	3,45	25,15	30,50
50	18,90	21,70	3,45	25,15	30,35
60	18,95	21,70	3,45	25,15	30,50

Tabela 4.22.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,454	0,202	2,71	1,46
10	0,434	0,211	1,81	2,93
20	0,445	0,200	0,68	2,44
30	0,434	0,206	1,81	0,49
40	0,419	0,199	5,20	2,93
50	0,407	0,207	7,92	0,98
60	0,419	0,203	5,20	0,98
Média	0,442	0,205		

Média Total das condutividades medidas - 0,323 kcal/hm°C

Tabela 4.22.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	58,10
2	57,20
3	59,07
Média	58,13

Tabela 4.23 Temperaturas Médias para a Câmara 3

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,50	22,90	3,90	26,80	30,50
10	19,55	22,75	4,05	26,80	30,45
20	19,45	22,70	4,10	26,80	30,45
30	19,45	22,70	4,10	26,80	30,40
40	19,30	22,65	4,10	26,75	30,30
50	19,40	22,60	4,10	26,70	30,25
60	19,30	22,60	4,10	26,70	30,30

Tabela 4.23.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,250	0,224	5,04	8,21
10	0,237	0,201	0,42	2,90
20	0,234	0,202	1,68	2,42
30	0,230	0,202	3,36	2,42
40	0,227	0,209	4,62	0,97
50	0,227	0,199	4,62	3,86
60	0,230	0,205	3,36	0,97
Média	0,238	0,207		

Média Total das condutividades medidas - 0,223 kcal/hm°C

Tabela 4.23.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	34,44
2	34,21
3	36,39
Média	35,01

Tabela 4.24 Temperaturas Médias para a Câmara 4

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,15	21,20	5,40	26,60	30,55
10	19,25	21,20	5,40	26,60	30,65
20	19,20	21,20	5,40	26,60	30,60
30	19,10	21,20	5,40	26,60	30,80
40	19,25	21,20	5,40	26,70	30,35
50	19,20	21,20	5,40	26,60	30,35
60	19,25	21,20	5,40	26,60	30,50

Tabela 4.24.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média	
			%	
0	0,189	0,088	2.58	1.15
10	0,194	0,083	0.00	4.60
20	0,192	0,086	1.03	1.15
30	0,202	0,091	4.12	4.60
40	0,170	0,081	12.37	6.90
50	0,179	0,086	7.73	1.15
60	0,187	0,083	3.61	4.60
Média	0,194	0,087		

Média Total das condutividades medidas - 0,141 kcal/hm°C

Tabela 4.24.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	22,18
2	21,45
3	22,86
4	21,84
5	21,66
6	21,69
Média	21,95

Tabela 4.25 Temperaturas Médias para a Câmara 5

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	20,30	21,20	4,80	26,00	30,45
10	20,30	21,20	4,80	26,00	30,55
20	20,30	21,20	4,85	26,05	30,35
30	20,25	21,25	4,80	26,05	30,55
40	20,35	21,25	4,80	26,05	30,45
50	20,30	21,30	4,80	26,10	30,45
60	20,25	21,30	4,80	26,10	30,70

Tabela 4.25.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,244	0,036	0,41	2,70
10	0,250	0,036	2,88	2,70
20	0,233	0,035	4,12	5,41
30	0,247	0,041	1,65	10,81
40	0,241	0,036	0,82	2,70
50	0,238	0,041	2,06	10,81
60	0,253	0,044	4,12	18,92
Média	0,243	0,037		

Média Total das condutividades medidas - 0,140 kcal/hm°C

Tabela 4.25.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	21,59
2	21,48
3	21,39
4	19,67
5	20,77
6	20,05
Média	20,82

Tabela 4.26 Temperaturas Médias para a Câmara 6

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,05	21,30	5,50	26,80	30,35
10	18,80	21,30	5,50	26,80	30,75
20	19,00	21,25	5,55	26,80	30,80
30	19,05	21,25	5,55	26,80	30,25
40	18,95	21,30	5,50	26,80	30,25
50	18,95	21,30	5,50	26,80	30,95
60	19,05	21,30	5,50	26,80	30,65

Tabela 4.26.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	K _a kcal/hm°C	K' _a kcal/hm°C	Desvio com relação à média	
			%	
0	0,165	0,096	5,17	2,04
10	0,185	0,109	6,32	11,22
20	0,186	0,095	6,90	3,06
30	0,158	0,093	9,20	5,10
40	0,165	0,101	5,17	3,06
50	0,196	0,101	12,64	3,06
60	0,180	0,096	3,45	2,04
Média	0,174	0,098		

Média Total das condutividades medidas - **0,136 kcal/hm°C**

Tabela 4.26.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	14,1
2	14,12
3	13,83
4	13,61
5	13,35
6	13,39
Média	13,73

Tabela 4.27 Temperaturas Médias para a Câmara 7

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,10	21,35	5,35	26,70	30,20
10	19,00	21,35	5,40	26,70	30,45
20	19,20	21,30	5,40	26,70	30,70
30	19,05	21,25	5,50	26,75	30,60
40	19,00	21,30	5,45	26,75	30,50
50	19,05	21,35	5,35	26,70	30,70
60	19,15	21,40	5,35	26,75	30,35

Tabela 4.27.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média %	
0	0,168	0,100	6,67	3,09
10	0,181	0,105	0,56	8,25
20	0,192	0,091	6,67	6,19
30	0,180	0,094	0,00	3,09
40	0,177	0,100	1,67	3,09
50	0,194	0,102	7,78	5,15
60	0,173	0,100	3,89	3,09
Média	0,180	0,097		

Média Total das condutividades medidas - 0,139 kcal/hm°C

Tabela 4.27.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	11,81
2	13,22
3	11,86
4	12,15
5	11,99
6	12,07
Média	12,18

Tabela 4.28 Temperaturas Médias para a Saída

Tempo (min.)	T1 °C	T2 °C	T3-T2 °C	T3 °C	T4 °C
0	19,05	21,80	5,60	27,40	30,35
10	19,05	21,80	5,60	27,40	30,46
20	19,05	21,80	5,60	27,40	30,40
30	19,00	21,80	5,60	27,40	30,35
40	18,95	21,8	5,60	27,40	30,40
50	18,95	21,80	5,60	27,40	30,55
60	19,10	21,80	5,60	27,40	30,50

Tabela 4.28.1 Condutividade Efetiva Média

Tempo (min)	Ka kcal/hm°C	K'a kcal/hm°C	Desvio com relação à média	
			%	
0	0,132	0,119	1,49	1,65
10	0,138	0,119	2,99	1,65
20	0,134	0,119	0,00	1,65
30	0,132	0,122	1,49	0,83
40	0,134	0,124	0,00	2,48
50	0,142	0,124	5,97	2,48
60	0,139	0,117	3,73	3,31
Média	0,134	0,121		

Média Total das condutividades medidas - **0,128 kcal/hm°C**

Tabela 4.28.2 Umidade

Testes	(g água/ g gel úmido)
1	11,07
2	11,61
3	11,62
4	10,79
5	11,00
6	10,47
Média	11,09

**Tabela 4.29 Umidade (g_{ág} / g gel úmido) X
Condutividade (Kcal/hm°C)**

Câmara	Umidade	Condutividade
Extrusor	0,721	0,467
Entrada	0,719	0,455
1	0,578	0,320
2	0,581	0,323
3	0,350	0,223
4	0,220	0,141
5	0,210	0,140
6	0,137	0,136
7	0,122	0,139
Saída	0,111	0,128

Com os dados da Tabela 4.29 aloca-se a curva que descreve a tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina, cuja linearização nos fornece a equação apresentada na Figura 4.6.

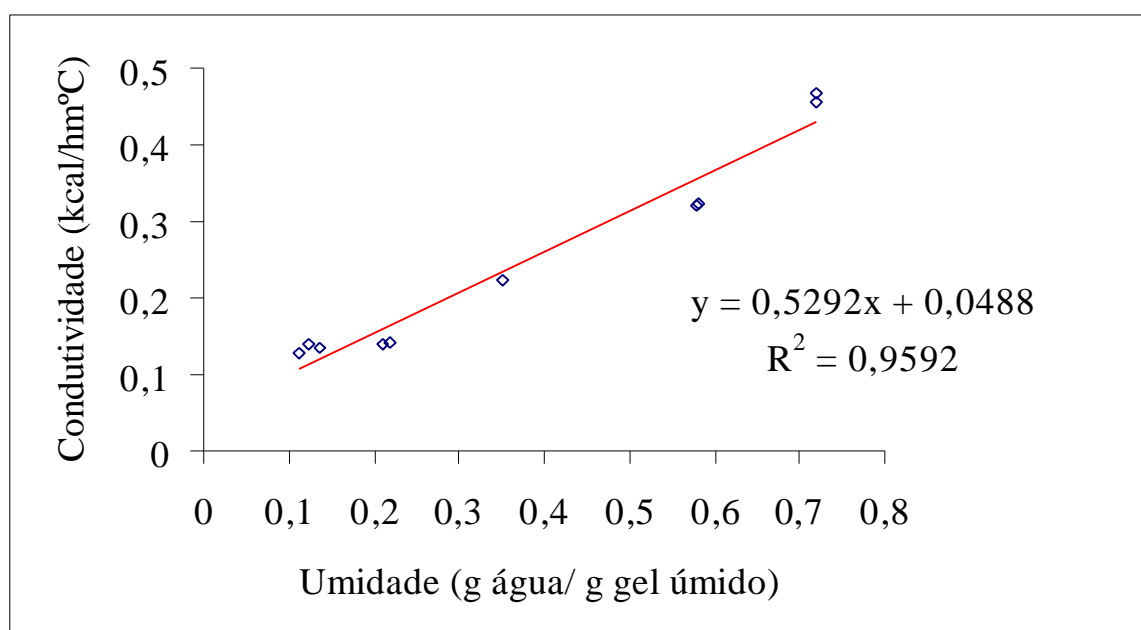


Figura 4.6 Evolução da Condutividade Térmica Efetiva da Gelatina com a Umidade

Fazendo a extrapolação da curva da Figura 4.6, adotando para a umidade um valor igual a 1 (um), resulta em um valor de condutividade térmica efetiva da gelatina igual a 0,578 Kcal/ hm°C, que é o valor aproximado da condutividade térmica da água, que à 20°C é de 0,511 kcal/h.m.°C, e à 30°C é de 0,526 kcal/h.m.°C, (Kreith,1977).

Analisando-se a Figura 4.5 e Figura 4.6, pode-se perceber claramente que a tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina com a umidade obedece aos princípios básicos da transmissão de calor apresentados pela literatura, ou seja, onde a umidade é alta, em torno dos 70%, a condutividade térmica da gelatina pode ser perfeitamente substituída pela condutividade térmica da água em modelagens matemáticas, porém, para valores de umidade mais baixos, em torno de 40%, deve-se realizar uma análise dos efeitos trazidos à secagem da gelatina, relacionados a estimação deste parâmetro, a fim de se obter o máximo rendimento operacional.

Os resultados dos testes apresentam-se de forma satisfatória tanto do ponto de vista experimental como do ponto de vista teórico, e a linearização destes resultados, conforme visto na Figura 4.5 e Figura 4.6, representa com fidelidade a tendência clara da evolução da condutividade térmica da gelatina, com a umidade durante todo o processo de secagem.

Determinada a tendência da curva que descreve a condutividade térmica da gelatina com a variação da umidade pode-se garantir que à medida que a umidade decresce, a condutividade térmica da gelatina também decresce, mantendo uma relação quase linear.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A inexistência na literatura de dados de Umidade versus Condutividade Térmica de Gelatina, demonstra a importância da obtenção destes valores para o estudo da secagem deste produto, pois após realizados os testes pode-se afirmar que a condutividade térmica efetiva da gelatina além de depender da umidade, depende também das condições ambientais, bem como das condições em que é produzida e das condições de operação da secagem.

Dos resultados experimentais obtidos verifica-se que a condutividade térmica da gelatina tende a crescer linearmente com a umidade, atingindo valores próximos ao da água para umidades acima de 50 % base úmida, mostrando claramente que em modelagens matemáticas a condutividade térmica não deve ser considerada igual à da água, e a extensão desta contribuição da aplicação da condutividade térmica variável somente poderá ser analisada mediante o desenvolvimento do modelo completo e a simulação do mesmo.

A curva Umidade X Condutividade, apresenta-se bem caracterizada, e em conjunto com outros parâmetros, pode servir para dimensionamento do secador, e principalmente para o aprimoramento dos modelos matemáticos existentes, substituindo o valor constante da condutividade térmica, igual a da água, usado nesses modelos, pela equação descrita pela linearização da curva, ou por um valor constante descrito por mais de uma linearização, que pode ser igual ao da água ou não.

Durante os testes experimentais observou-se que a condutividade térmica da gelatina sofre influência da matéria-prima utilizada em sua fabricação; do processo de fabricação; da espessura da camada de secagem, de modo que as camadas inferiores podem secar mais lentamente, e a umidade pode não ser homogênea naquela câmara de secagem; das temperaturas das

câmaras de secagem e do ambiente onde estão sendo realizadas as medidas de condutividade térmica. Deste modo, a propriedade condutividade térmica terá um valor específico dependendo destas características. Pode-se então afirmar que é de grande importância a obtenção da linearização da curva a qual mostra claramente a tendência da evolução da Condutividade Térmica da Gelatina com a Umidade.

As análises com sonda se tornaram bastante importantes para o desenvolvimento dos testes com placas paralelas, pois a partir das sondas é que se tomou conhecimento da ordem de grandeza da condutividade térmica da gelatina, influenciando na principal tomada de decisão, que foi a substituição, no sistema de placas paralelas, da célula de maior área de medida pela de menor área, eliminando a influência da inércia térmica do sistema, bem como os possíveis efeitos de borda causados pelas placas quadradas.

Verifica-se que a não ocorrência de distorções acentuadas, entre os valores obtidos com Sonda Linear e Equipamento de Placas Paralelas, vem confirmar o desempenho do equipamento construído, atendendo ao objetivo para o qual foi proposto.

O equipamento desenvolvido produz resultados confiáveis, desde que sejam tomados os devidos cuidados de montagem e desmontagem da célula; o leito da camada de amostra de teste seja mantido o mais homogêneo e compacto possível; o ambiente, onde estão sendo realizadas as medidas, seja mantido sem ventilação e com temperatura bem definida; o vácuo seja mantido constante durante as leituras de temperaturas.

As sugestões para a modificação do equipamento desenvolvido facilitarão sua utilização podendo ser empregado na obtenção de condutividade térmica de outros materiais granulares respeitadas suas limitações de funcionalidade.

CAPÍTULO VI

RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

Para que o equipamento de medidas se torne mais eficiente, de maneira a facilitar o manuseio, sugere-se algumas modificações nas instalações da câmara de vácuo, tais como:

◇ isolamento dos “bornes” do termômetro digital e da chave seletora, mantendo-os afastados do sistema geral, evitando ao máximo interferências externas;

◇ controlar melhor a temperatura ambiente, para reduzir as perdas térmicas dos banhos, os quais são bastante sensíveis a qualquer tipo de movimento, que faça circular o ar, eliminando sua interferência na temperatura da célula, que necessita ser constante e próxima da ambiente;

◇ manter a parte inferior da célula fixa, juntamente com as mangueiras e termopares, para evitar que os termopares se rompam e as mangueiras sofram desgastes desnecessários, pois não mais serão removidos durante a troca de amostra.

A Figura 6.1 apresenta um esboço da nova câmara sugerida, sendo que o diâmetro da câmara deverá ser pelo menos 5 (cinco) vezes maior que o diâmetro das jaquetas de água, para facilitar o acomodamento e o manuseio das mangueiras.

As mangueiras deverão ser substituídas por mangueiras mais resistentes, que não sofram estrangulamento pelo sistema de vedação que atualmente é realizado por anéis de borracha.

A câmara deverá ser de material resistente de maneira a suportar um vácuo de pelo menos 500 mmHg.

A modificação deverá ainda possibilitar a realização de medidas de condutividade térmica da gelatina, ou de outros materiais, variando a espessura da camada de amostra, mantendo fixa a espessura dos padrões.

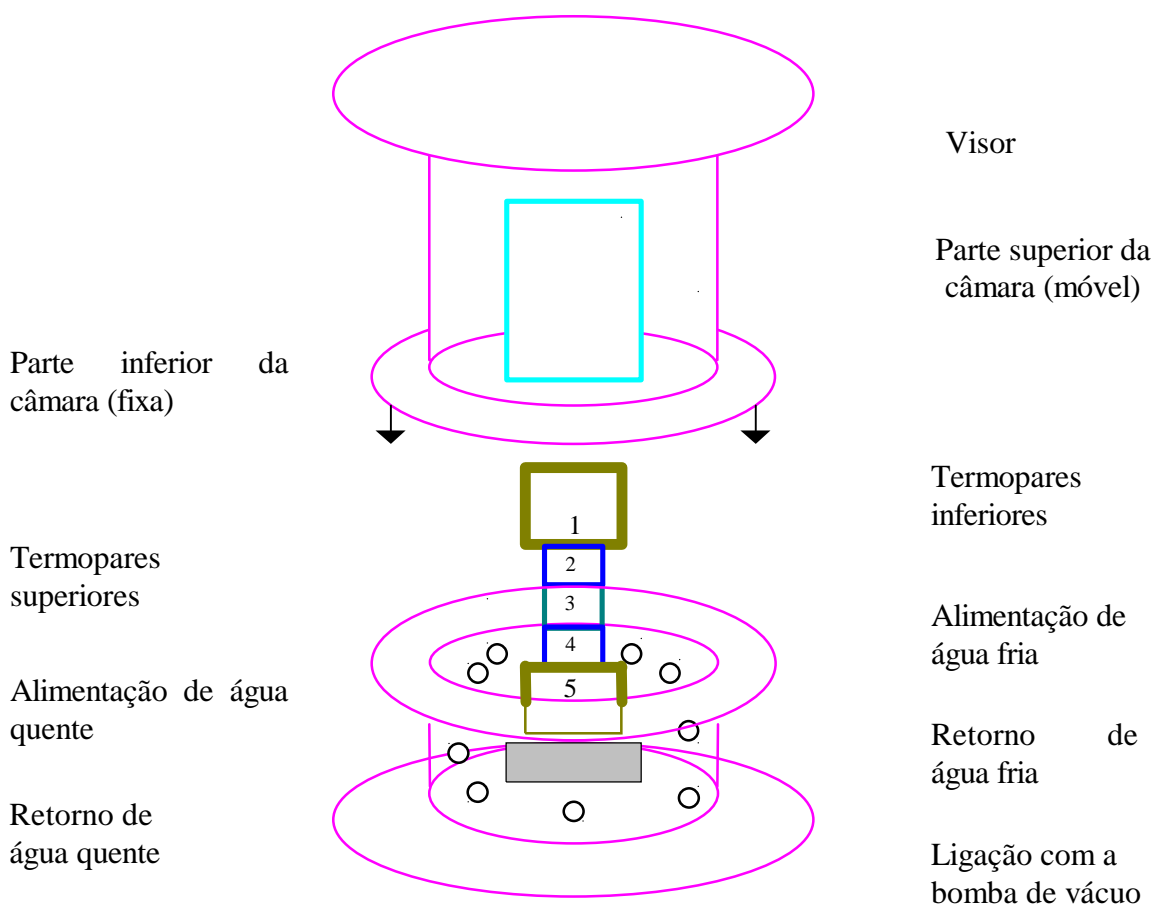


Figura 6.1 Esboço da Câmara de Medida Modificada

Antes de levantar a jaqueta deve-se tomar cuidado ao soltar o termopar que se encontra acoplado entre a placa padrão superior e a jaqueta de água quente, para que o mesmo não se rompa.

CAPÍTULO VII**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BATES, K. O - Thermal Conductivity of Liquids. Ind. Eng. Chem. 25: 431-432, 1933
- BENNETT, C. O & MYERS, J.E - Fenômenos de Transportes Cap.6, p.1-6, 1978
- BERTOLI, A. J & NEITZEL, I - Secagem de Gelatina - Relatório Interno DEQ/UEM, p.1-28,1987
- BLACKWELL, J. H - A Transient - Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulation Materials in Bulk.J. of Apply ,H. Appl.Phys, 25: p.2-3, 1954
- BLACKWELL, J. H - The Axial - Flow Error in the Thermal Conductivity Probe, Can J.Phys, 34, p.413-415, 1956
- BLACKWELL, J. H - Radial - Axial Heat Flow in Regions Bounded Internally by Circular Cylinders , Can J.Phys, 31, p.472, 1953
- BLOOM, O. T. -U.S. Patent 1 540 979, 1929
- BRUIN, S & LUYBEN, K. C. A. M - Drying of Food Materials: a review of recents developments. In: Advances in Drying, ed. Awm S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, V.I, p.155-215, 1980
- CARSLAW, H. S & JAEGGER, J. C - Conduction of Heat in Solids Oxford University, 1949
- CHIRIFE, J - Fundamentals of the Drying Mechanism During Air Dehydration of foods. In: Advances in Drying,ed. Arum S. Mujumdar. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London, V.1, p73-102, 1983

- CORRÊA, R. G & FREIRE, J. T - Determinação da Condutividade Térmica II - Análise Numérica - Anais XV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, V.1, p.162-165, 1987
- COULSON, J. M & RICHARDSON, J. F - Chemical Engineering, Particle Technology and Separation Process, V.2, Great Brétain by BPC Wheatons, Exeter, p.657-660, 1991
- DANIS, M; GOBBÉ, C & ROYER, J. J - Procédures d'utilisation d'un Conduvímètre à Barre Divisée pour des Échantillons Grenus: Aplication au Cas des Granites. Int. J. Heat Transfer, V.39, nº 10, p.2183-2187, Great Brétain, 1996
- DAUDIN, J.D - Calcul des Cinetiques de Séchage par l'air. Chaud des Produits Biologiques Solides. Science des Aliments, V.3, p.1-36, 1983
- ECB - Manual do Termômetro Digital MDT - 2000, 1984
- FREIRE, J.T - Transferência de Calor em Meios Porosos- Tópicos Especiais em Sistemas Particulados, p.39-95, 1982
- GUBULIN, J.C & FREIRE, J.T - Tópicos Especiais em Fenômenos de Transporte, Cap 6, 1990
- HOLMAN, J.P. Transferência de Calor - Coeficiente Global de Transferência de Calor, McGraw-Hill International Book Company, p.31-32, São Paulo, 570p. 1982
- KREITH, F - Princípios da Transmissão de Calor - Editora Edgard Blücher, Terceira Edição, 500p., 1977
- KRISHER, O & KAST, W - Die Wissenschaftlienen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3 Auflage, Springer, 1978
- LEINER GELATINAS DO BRASIL LTDA - Composição e Propriedades Químicas e Físicas da Gelatina - Relatório Interno Leiner
- MASAMUNE, S & SMITH, J. M - Thermal Conductivity of Porous Catalyst Pellets - Journal of Chemical and Engineering Data, nº 1, V.8, January 1963.

- MC CABE, W.L & SMITH, J.C - Unit Operations of Chemical Engineering
Third Edition, p.995-998, 1976
- MEDEIROS, J. L & MASSARANI, G - Secagem do Bagaço de Cana,
Secagem de Produtos Agrícolas - Coletânea de Trabalhos, p.77-119, 1984
- NEITZEL, I & MASSARANI, G - Análise do Desempenho de um Secador de
Esteira, Anais do XV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, V.II,
p.466-477, 1987
- NEITZEL, I - Considerações sobre a Simulação de um Secador de Gelatina
Relatório Interno DEQ/UEM, 5p.,1990.
- NEITZEL, I - Comunicações pessoais, 1995
- OGIWARA, K ; ARAI, Y & SATTO, S - Thermal Conductivities of
Hydrocarbons and their Binary Mixtures, I.E.C Fund, V.19, p.295-300,
1980
- OTMER, K -Enciclopédia de Chemical Technology, New York, John Wiley &
Sons, V.10, 1966.
- PIETROBON, C. L. R - Desenvolvimento de Sistemas para Determinação da
Condutividade Térmica, São Carlos, p.1-100, 1988 . Dissertação de
Mestrado - UFSCar.
- PUZZI, D - Manual de Armazenamento de Grãos, Cap.2 e 3, Química,
Terceira Edição, 50p.,1975
- REVISTA BRASILEIRA DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS, Ano 3, nº3,
Viçosa, Julho 1978.
- SILVA, E. A -Secagem de Gelatina - Análise do Perfil de Concentração e
Temperatura no Interior do Gel, Dissertação de Mestrado PEQ-DEQ/UEM,
p.1-120, 1995.
- SILVEIRA, A. M & FREIRE, J. T - Construção de uma Célula para a Medida
da Condutividade Térmica Efetiva na Estagnação do Gel-Melaço Anais do
VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, V.1, p.146-155, 1984.

- SMITH, J. M & VAN NESS, H .C - Introdução à Termodinâmica da Engenharia, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1978
- TOBINAGA, S & PINTO, L.A.A - Secagem de Materiais Fibrosos- Músculo de Peixes - Tópicos Especiais em Secagem, V.I, p.215 - 219, 1992
- TREYBAL, R.E - Mass Transfer Operations, Second Edition, p.569-576, 1968
- TYE, R.P - Thermal Conductivity, V.1 e V.2, Academic Press, London and New York, 770p.,1969
- VAN DER HELD, E.F.M & VAN DRUNEN, F.G - A Method of Measuring the Thermal Conductivity of Liquids, Physica XV, p.865, 1949.
- VARGAFITK, N.B; FILIPPOV, L.P; TARZIMANOV, A.A & TPTSKII,E.E - Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases, CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd., N.W., Boca Raton, Flórida, p.1-12,1994.
- WARD, A.G & COURTS, A. - Food Science and Technology - A series of Monographs - The Science and Tecnology of Gelatin, Academic Press,London, New York, San Francisco, 560p.1977

CAPÍTULO VIII

ANEXOS

8.1 Modelo Matemático de Silva (1995)

8.1.1 Nomenclatura

a	área específica (m^2/m^3)
C	concentração do gás ($\text{kgmol ar}/\text{m}^3$)
C_{par}	calor espec. à pressão const.ar (molar) ($\text{J}/\text{kgmol } ^\circ\text{C}$)
C_{ps}	calor específico a pressão const. da partícula (mássico) ($\text{J}/\text{Kg K}$)
C_{var}	calor espec.a vol. const. ar ($\text{J}/\text{kgmol C}$)
D	coeficiente de difusão mássica (m^2/h)
F	velocidade molar ($\text{kg mol ar} / \text{m}^2 \text{ h}$)
h_c	coeficiente transferência calor convectivo. ($\text{J}/ \text{m}^2 \text{ h K}$)
K	condutividade térmica da gelatina.($\text{J}/\text{m.h.K}$)
K_y	coef. de transf. de massa ($\text{kg água}/\Delta \bar{Y} \text{ m}^2\text{h}$)
M_{ar}	peso molecular do ar (kg/kgmol)
M_w	peso molecular da água (kg/kgmol)
r	eixo do sistema - coordenadas cilíndricas (m)

R	raio da partícula (m)
t	tempo (h)
T _{ar}	Temperatura do ar (°C)
T _p	Temperatura da partícula (°C)
u	Umidade da partícula (base úmida)
X	umidade da partícula (kg água / kg partícula seca)
X _c	umidade crítica
X _e	umidade de equilíbrio
Y	umidade do ar (kg mol água/kg mol ar úmido)
ε	porosidade do leito
α	difusividade térmica (m ² /h)
ψ	taxa de secagem por unidade de vol.do leito (kg ág/ m ³ h)
ρ _a	densidade aparente (kg/m ³)
ΔH _S	calor de desorção (J/kg água)
ρ _s	densidade da gelatina seca (kg/m ³)

8.1.2 Modelagem da Secagem da Gelatina no Interior do Leito

8.1.2.1 Balanço de quantidade de movimento no gás

$$\frac{\partial F}{\partial t} = -2 \frac{F}{C} \frac{\partial F}{\partial Z} + \left[\frac{F}{C} \right]^2 \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{R_g C}{M_{ar}} \frac{\partial T_{ar}}{\partial Z} - \frac{R_g T_{ar}}{M_{ar}} \frac{\partial C}{\partial Z}$$

8.1.2.2 Balanço de massa no gás

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\psi}{M_w \varepsilon} - \frac{\partial F}{\partial Z}$$

8.1.2.3 Balanço do componente água no gás

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\psi}{M_w \varepsilon} \frac{(1-Y)}{C} - \frac{F}{C} \frac{\partial F}{\partial Z}$$

8.1.2.4 Balanço de energia no gás

$$\frac{\partial T_{ar}}{\partial t} = \frac{1}{C_{Var} C} \left[\frac{\psi}{\varepsilon} \Delta H_s - \frac{h_c a}{\varepsilon} (T_g - T_{ar}) \right] -$$

$$\frac{1}{C_{Var} C} \left[FC_{Par} \frac{\partial T_{ar}}{\partial Z} + R_g T_{ar} \frac{\partial F}{\partial Z} \right]$$

8.1.2.5 Balanço de massa na gelatina

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{\psi}{\rho_a}$$

8.1.2.6 Balanço de energia na gelatina

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{1}{\rho_a (C_{P_s} + XC_{P_l})} \left[\frac{h_c a}{\varepsilon} (T_{ar} - T_g) - \psi \Delta H_s \right]$$

Como complemento apresentam-se ainda as expressões utilizadas no cálculo da taxa de secagem, que é variável com a fase do processo, como descrito em Silva, (1995).

8.1.2.7 Taxa de secagem primeira fase

Devido ao alto teor de umidade no sólido, o processo de secagem é controlado pela resistência à transferência de massa do vapor da água formado na superfície do sólido até o seio do gás.

$$\psi = K_y a (\bar{Y}_{sat}(T_g) - \bar{Y})$$

8.1.2.8 Taxa de secagem segunda fase

Inicia-se quando a umidade da gelatina atinge o valor da umidade crítica. Durante esta etapa o processo é controlado pela difusão da água no interior do gel.

$$\psi = K_y a (\bar{Y}_{\text{sat}}(T_p(t, R)) - \bar{Y}) \frac{(u(t, R) - X_e)}{(X_c - X_e)}$$

8.1.2.9 Conversão de unidades de umidade do ar

(kgmol água/kgmol gel úmido) em (kg água/kg ar seco)

$$\bar{Y} = \frac{M_w Y}{M_{\text{ar}}(1 - Y)}$$

8.1.3 Modelagem da Secagem da Partícula Cilíndrica de Gelatina

8.1.3.1 Balanço de massa na partícula cilíndrica de gelatina

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D \frac{\partial u}{\partial r} \right]$$

8.1.3.2 Balanço de energia na partícula cilíndrica de gelatina

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{K}{\rho_s C_p} \frac{\partial T_p}{\partial r} \right]$$

Condição inicial $T_p(0, R) = T_{p0}$

Condição de Contorno

$$\frac{\partial T_p}{\partial r}(t, R) = \frac{C_p}{K} h_c (T_{ar} - T_p) - \frac{C_p \Psi_p}{K} \Delta H_s$$

8.1.3.3 Transformação da umidade base úmida (BU) em umidade base seca (BS)

A obtenção da umidade em base seca a partir da umidade em base úmida é feita através da expressão que segue:

$$BS = \frac{BU}{1 - BU}$$

8.2 Aferição Termômetro Digital/ Milivoltímetro

Tabela 8.2.1 Comparação Termômetro Digital vs Milivoltímetro

Temperatura lida (°C)	Correspondente na tabela T x mV (mV)
9,3	0,35
9,9	0,38
10,0	0,38
10,1	0,38
12,7	0,49
12,9	0,50
17,9	0,70
18,0	0,71
18,2	0,72
19,8	0,78

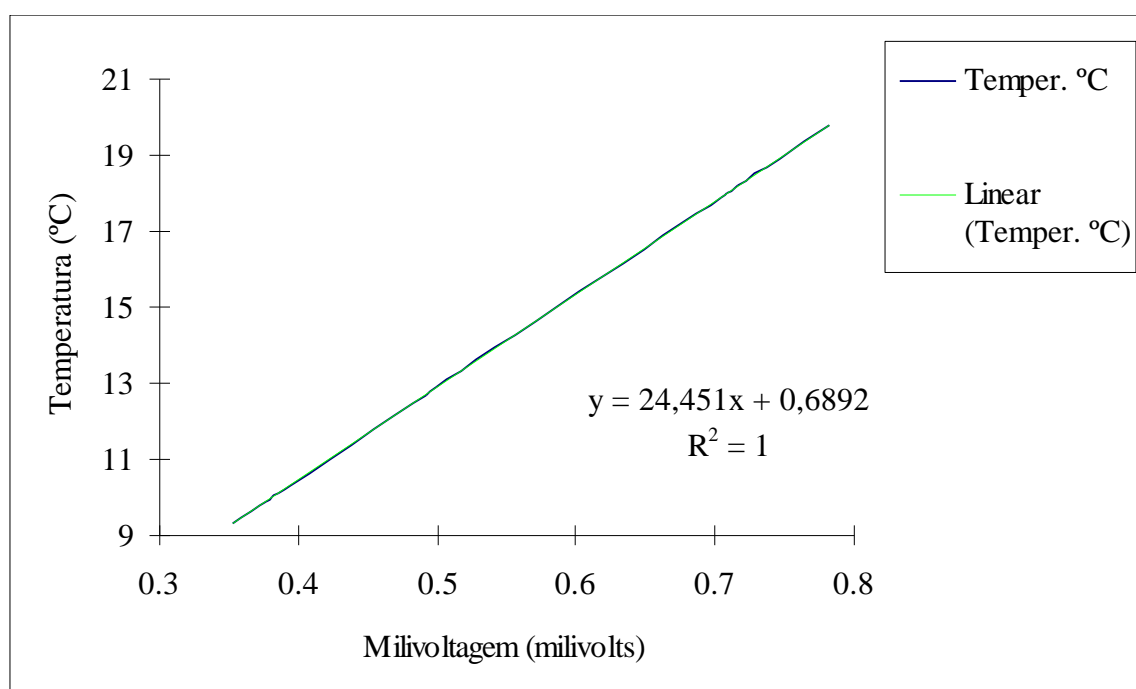
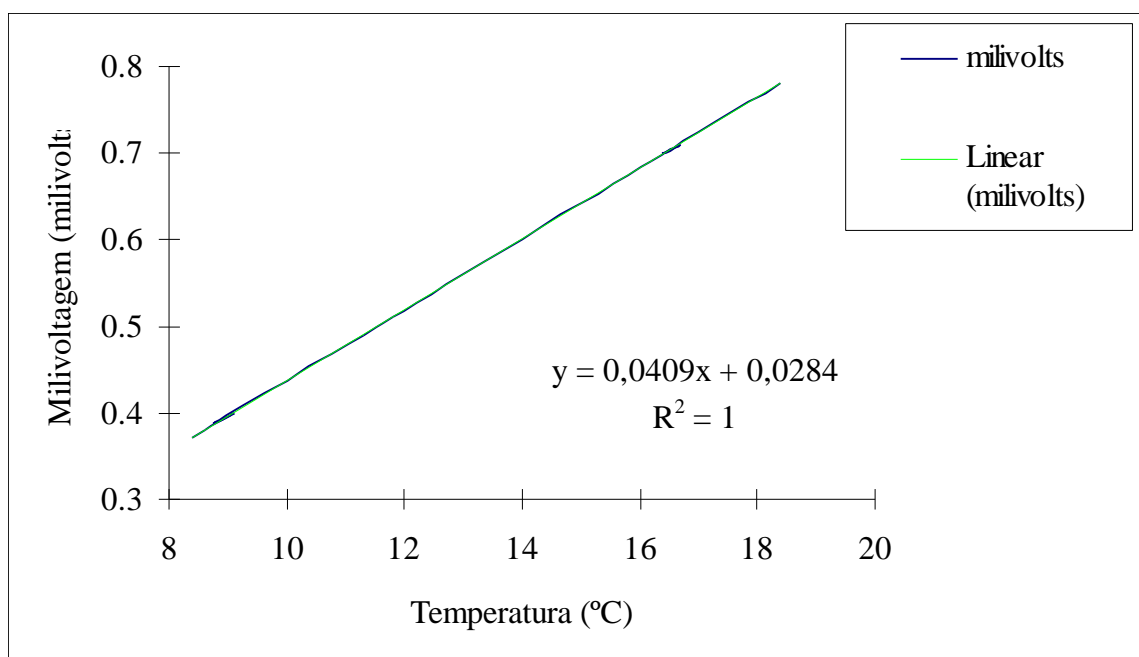


Figura 8.2.1 Comparação Termômetro Digital vs Milivoltímetro

Tabela 8.2.2 Comparação Milivoltímetro vs Termômetro Digital

Milivoltagem lida (mV)	Correspondente na tabela T x mV (°C)
0,37	8,4
0,38	8,6
0,40	9,1
0,39	8,8
0,49	11,3
0,51	11,8
0,69	16,2
0,71	16,7
0,70	16,4
0,78	18,4

**Figura 8.2.2 Comparação Milivoltímetro vs Termômetro Digital**

8.3 Fotografias do Equipamento

Na Figura 8.3.1 é apresentada a fotografia do equipamento de placas paralelas II

Na Figura 8.3.2 é apresentada a fotografia da célula de medidas do equipamento de placas paralelas II.

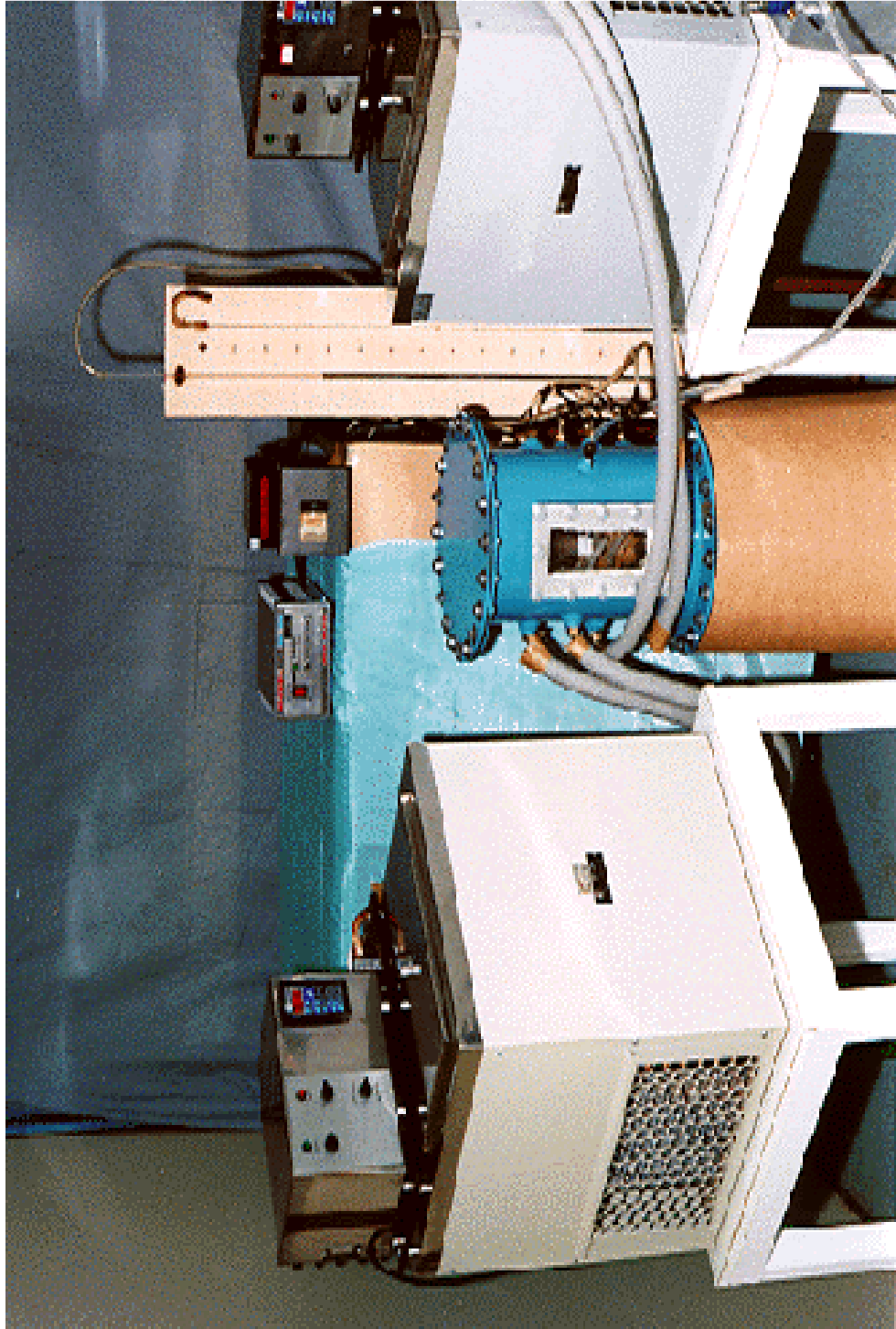


Figura 8.3.1 Fotografia do Equipamento de Placas Paralelas II

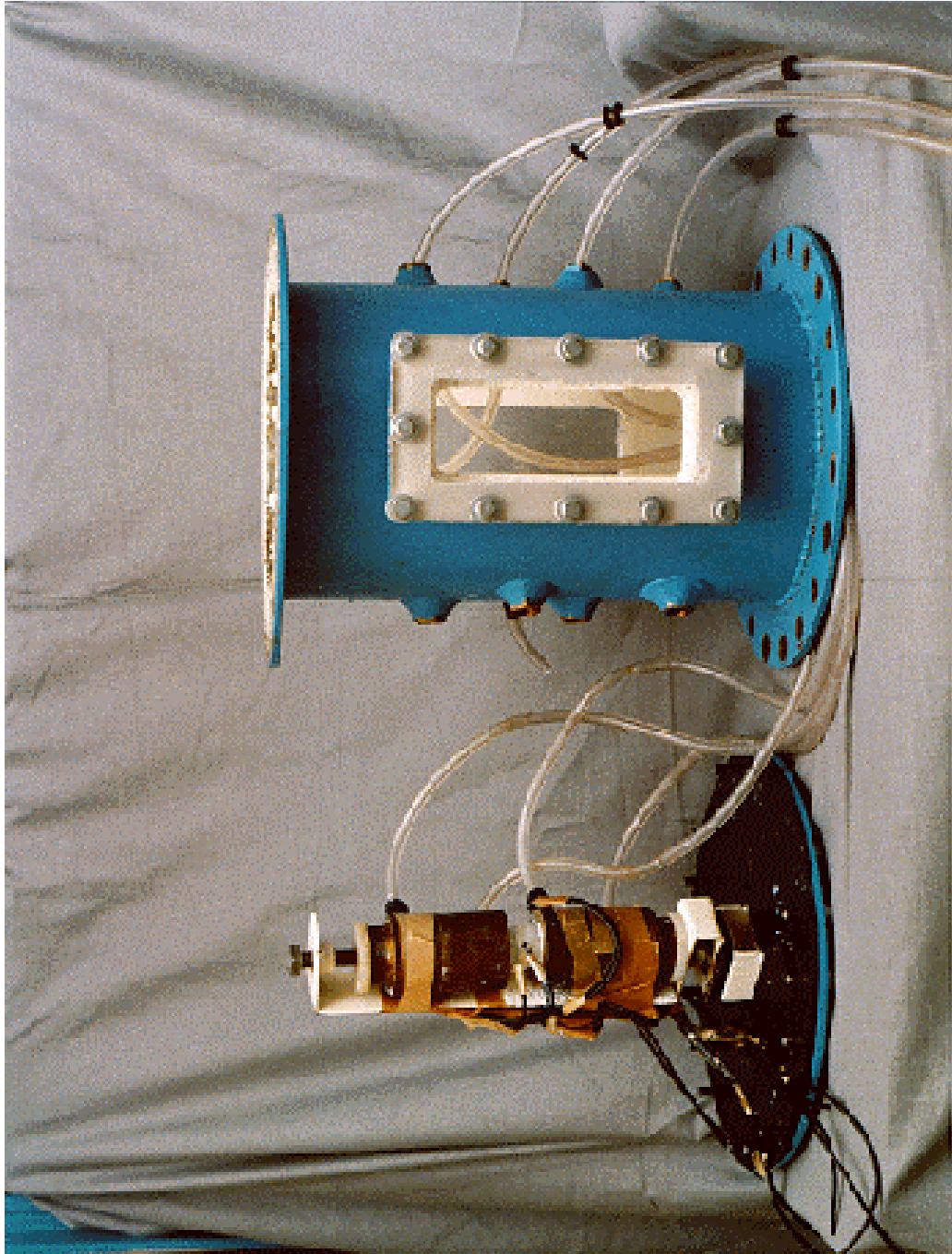


Figura 8.3.2 Fotografia da Célula de Medidas do Equipamento de Placas Paralelas II