

ERRATA

1. No primeiro parágrafo do SUMMARY na primeira linha onde se lê measured ,
leia-se measure , na mesma página no segundo parágrafo na primeira li-
nha onde se lê especial leia-se special.
2. Página 6 segundo parágrafo linha 5 onde se lê convecção leia-se condução.
3. Página 13 último parágrafo na primeira linha onde se lê ,Y leia-se ,Y₀ .
4. Página 14 quarto parágrafo linha 2 onde se lê para o . leia-se para o
cálculo.
5. Página 15 sexto parágrafo linha 1 onde se lê Experimentalmente pode leia-
se Experimentalmente a pode.
6. Página 16 quarta equação onde se lê k | g²(k).... leia-se k | g²(k)....
na mesma página no quarto parágrafo 12ª linha 2 onde se lê valor leia-se calor
7. Página 20 quarto parágrafo linha 2 onde se lê Saravacos Pilsworth leia-
se Sarevacos e Pilsworth
8. Página 28 equação nº 21 onde se lê:

$$\frac{W R \Delta s}{T_1} + \int_{T_1}^{T_s} C_p dT \quad \text{leia-se} \quad \frac{W R \left[\Delta s + \int_{T_1}^{T_s} C_p dT \right]}{T_1}$$

9. Página 57 linha 17 onde se lê m_f leia-se m₁ .
10. Página 58 LETRAS GREGAS linha 1 onde se lê m/sec leia-se m²/sec.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E

VALORES DA LITERATURA

BE - m. A. J. M. C. 1.
FLA - 11 - 11 - 11

Mario Bautista Castro

Engenheiro Químico

Orientador:

Dr. M.A. Rao

Professor da Faculdade de Tecnologia de Alimentos

Dissertação apresentada à Faculdade de Tecnologia de Alimen
tos da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do tí
tulo de Mestre em Ciências em Tecnologia de Alimentos.

ÍNDICE

	página
RESUMO	
SUMMARY	
INTRODUÇÃO	1
I. MÉTODOS GERAIS PARA DETERMINAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA. . .	3
A. Para o estado estacionário	4
1. Isotérmica Cilíndrica	4
2. Isotérmica Plana	6
3. Isotérmica Esférica.	7
4. Vantagens, desvantagens e fontes de erro do <u>método</u> estacionário	8
B. Para o estado não estacionário	9
1. Técnica de Linha Fonte ("Source-Line Technique")	10
2. Técnica da Sonda ("Probe Technique")	13
3. Vantagens, desvantagens e fontes de erro do <u>método</u> não estacionário.	14
C. Indiretos	15
1. Difusividade Térmica	15
2. Penetração de Calor	16
II. CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM OPERAÇÕES DE LIOFILIZAÇÃO E REFRI GERAÇÃO	18
A. Liofilização	18
B. Refrigeração	24
III. TABELA DE VALORES	28
IV. NOMENCLATURA	57
V. BIBLIOGRAFIA	59

...00000...

Com todo carinho:

A meus queridos pais

Pela sua ajuda material e moral:

A Nadia

AGRADECIMENTOS

Aos professores , Dr. M.A. Rao pela sua orientação na preparação deste trabalho, a Engenheira Iracema de Oliveira Moraes e ao Engenheiro Theo Kieckbusch, por sua valiosa ajuda na parte técnica.

Ao Diretor da Faculdade de Tecnologia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, Dr. André Tosello por sua dedicação especial ao Curso de Post-Graduação.

A Organização dos Estados Americanos, pela oportunidade e ajuda econômica proporcionada para que este trabalho fosse realizado.

A todos,que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho apresentamos os métodos comuns usados para medir a con du t i v i d a d a d e t é r m i c a de produtos alimentícios, juntamente com suas van ta g e n s e des va n t a g e n s.

Além disso, apresentamos uma extensa literatura de valores da con du t i v i d a d e t é r m i c a nos Sistemas de Unidades Inglês e Internacional.

Devido a especial importância das operações de refrigeração e lio fi li za ç ã o de muitos alimentos, discutimos em um capítulo separado, os estu dos relativos a condutividade térmica a baixas temperaturas e a baixas pressões. Também é discutida a influência de temperatura, pressão e po ro si d a d e sô b r e a condutividade térmica para a operação de lio fi li za ç ã o.

A condutividade térmica é uma propriedade física específica de cada ma te ri al e seu valor é fixo para todas condições de pressão e temperatura. No caso de produtos alimentícios, devido a sua anisotropia e he te ro ge ne i d a d e, os valores da condutividade térmica citados na literatura di fe re m, às vezes amplamente, para um dado produto. Torna-se então ne ce ss á ri o determinar experimentalmente a condutividade térmica, quando valo res ex atos são requeridos. O presente trabalho provê informação ade qua da para facilitar a escolha do método conveniente. No caso de de te r mi na ç õ es experimentais, somente é necessária informação de ordem de ma g n i t u d e, podendo então ser usados convenientemente os valores tabelados.

SUMMARY

In this work we present the common methods used to measure the thermal conductivity of food products along with their advantages and disadvantages. In addition, we present extensive literature values of thermal conductivities in both the English and International System of Units.

Due to the special importance of refrigerating and freeze drying of many foods, we discuss in a separate chapter the studies on thermal conductivity at low temperatures and low pressures. The influence of temperature, pressure and porosity in the thermal conductivity for freeze drying operations is discussed.

The thermal conductivity is a physical property unique to each material and its value is fixed for given conditions of pressure and temperature. In the case of food products, because of their anisotropy and non-homogeneity, the values of thermal conductivity in the literature differ, sometimes widely for a given product. It thus becomes necessary to determine experimentally the thermal conductivities where reliable values are necessary. The present work provides adequate information to facilitate the selection of a suitable method. In the event, only an order magnitude information regarding the thermal conductivity is necessary, then the tabulated values may be used conveniently.

RESUMEN

En este trabajo presentamos los métodos comunmente usados para evaluar la conductividad térmica de productos alimenticios, incluyendo un con junto de ventajas y desventajas. Además, presentamos una amplia gamma de valores de la conductividad térmica en el Sistema Inglés como tam bien en el Sistema Internacional de Unidades.

Debido a la especial importância de la refrigeración y liofilización de muchos alimentos, discutimos, en un capítulo separado el estudio de la conductividad térmica a bajas temperaturas y presiones. También es dis cutido la influência de la temperatura, presión y porosidad para la operación de liofilización.

La conductividade térmica es una propiedad física particular de cada material y tiene un valor fijo para determinadas condiciones de presión y temperatura. En el caso de productos alimenticios debido a su estruc tura anisótropa y heterogénea, los valores reportados en la literatura difieren algunas veces ampliamente, para un producto dado; siendo neces sario entonces una determinación individual para obtener un valor exac to. El presente trabajo provee adecuada información para facilitar la selección de métodos convenientes. Para el caso de determinaciones expe rimentales sólamente es necesario información del orden de magnitud de la conductividad térmica, entonces, los valores tabulados pueden ser convenientemente usados.

INTRODUÇÃO

O conhecimento de condutividade térmica dos alimentos é indispensável, na faixa das altas e baixas temperaturas, para o cálculo das operações que envolvem: secagem, resfriamento, esterilização, liofilização, congelamento, etc.

O objetivo, deste trabalho, é proporcionar ao interessado todos os métodos conhecidos para determinação de condutividade térmica de alimentos, para que possa adaptá-los a seus propósitos de pesquisas, incluindo, além disso, uma extensa tabela de valores que fornece dados apropriados para o projeto de equipamentos para indústria alimentícia.

No capítulo I descrevem-se métodos e equipamentos para calcular a condutividade térmica dos alimentos sólidos, líquidos ou fluídos pastosos com específica bibliografia, para quem necessitar de maiores detalhes. A classificação está baseada no regime de transporte de energia utilizado, ou seja, métodos de estado estacionário, não estacionário e outros que são métodos indiretos de medida. Para cada caso se relaciona um conjunto de vantagens e desvantagens, a fim de facilitar sua aplicação.

O capítulo II é dedicado a uma breve discussão das operações de grande importância na indústria alimentícia: a liofilização e a refrigeração (resfriamento e congelamento). No primeiro caso se faz uma revisão bibliográfica dos estudos feitos da condutividade térmica na liofilização, em dependência com a pressão, a porosidade do produto, a temperatura de operação e com as condutividades individuais do material poroso bem como do gás que ocupa os poros.

Para o estudo da condutividade térmica na refrigeração, se considerou Lentz (1961) como referência.

No capítulo III estão compilados valores de condutividades térmicas de produtos alimentícios, no sistema inglês e também no sistema internacional de unidades, extraídos de diversas fontes bibliográficas.

Revisões bibliográficas de grande utilidade foram de publicações de Reidy (1971); Woodams e Nowrey (1968) e Jason e Jawitt (1969).

I. MÉTODOS GERAIS PARA DETERMINAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica k de qualquer elemento está definida pela lei de Fourier da condução de calor unidimensional em estado não estacionário:

$$\frac{dQ}{d\theta} = -k A \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (1)$$

onde dQ é o calor transmitido no tempo $d\theta$ ao longo de um gradiente de temperatura (dT/dx) perpendicular à área A . O sinal menos indica, que o calor é transferido em sentido contrário ao gradiente positivo de temperatura. Deste modo, qualquer método para determinar o valor absoluto de k requer o conhecimento de uma distribuição de temperatura, com simultânea medida de fluxo de calor. A distribuição de temperatura em coordenadas cartesianas de um sólido quando a condutividade é uniforme, é definida por:

$$\frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + u \quad (2)$$

sendo que em produtos onde não há geração interna de energia, o termo u torna-se zero e em todos os métodos abaixo, observar-se-á esta condição.

Os equipamentos, para a determinação da condutividade térmica podem ser divididos em duas classes:

- 1º - Aquêles, nos quais os valores locais da temperatura T são constantes em relação ao tempo θ (métodos estacionários).
- 2º - Aquêles, nos quais os valores locais da temperatura T variam com relação ao tempo θ (métodos não estacionários).

Das equações (1) e (2) se obtém o valor k , em função de dados já conhecidos.

Frequentemente os valores de k encontrados na literatura estão em desacordo. Esta aparente contradição é atribuída não somente a erros instrumentais como também ao uso de métodos, alguns dos quais não são convenientes para determinados alimentos (Reidy, 1971). Embora cuidados sejam tomados para evitar erros, o desacordo persistirá, devido à heterogeneidade de cada amostra (exemplo: conteúdo de umidade, de proteína, gordura, etc.). Por esta razão, mencionam-se os erros dos métodos nas determinações experimentais.

A. Métodos do Estado Estacionário

A condição fundamental do estado estacionário é que $(\partial T / \partial \theta)$ na Equação (2) seja zero, ficando reduzida a:

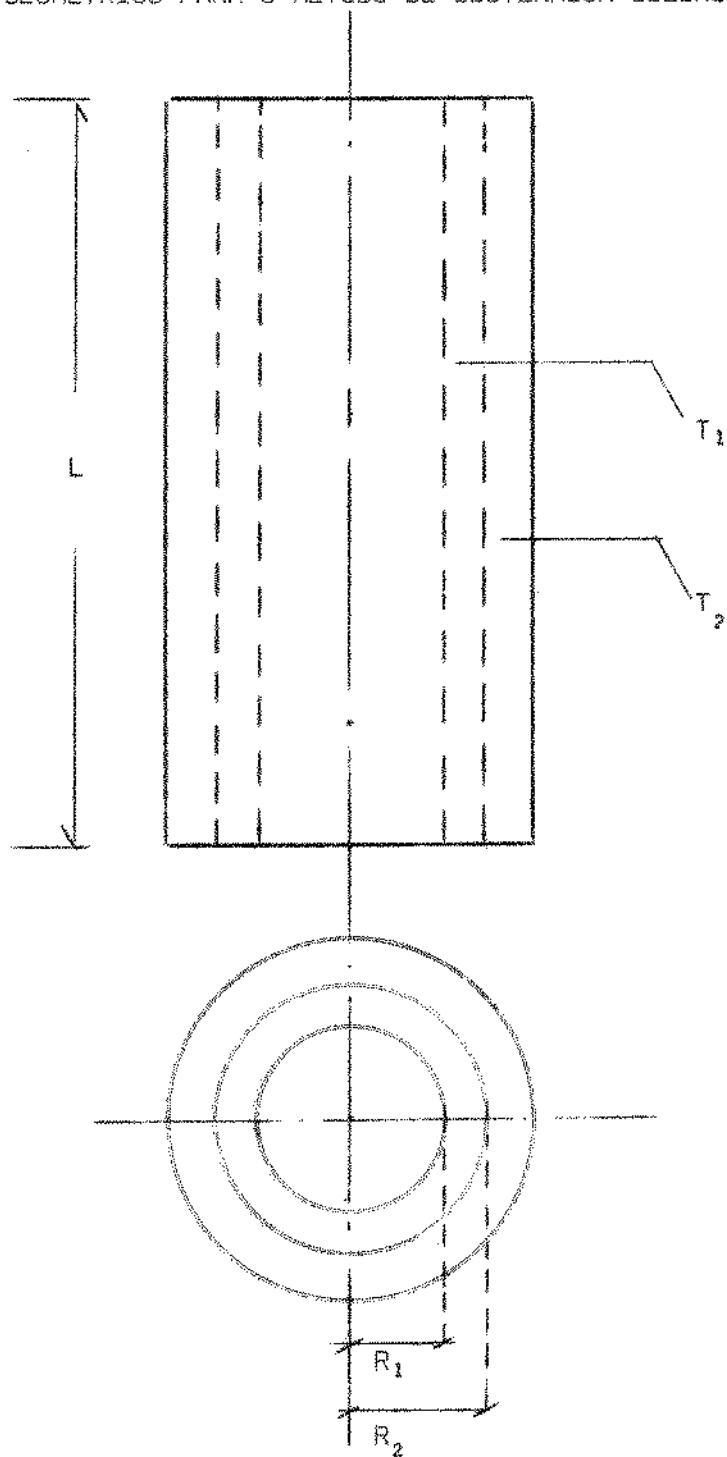
$$0 = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

Ao se resolver as Equações (1) e (3), de acordo com a geometria de um sistema particular, obteremos as soluções para os métodos do regime estacionário.

1 - Isotérmica cilíndrica. Consiste de dois cilindros montados coaxialmente; como na Figura 1. O cilindro interno é aquecido, mediante uma resistência elétrica, produzindo uma quantidade de calor Q , o externo é esfriado com água. O fluido, cujo valor de k é desconhecido, é posto no espaço anular; pares termopelétricos são usados para medir a diferença de temperatura através do fluido.

FIGURA 1

MODELO GEOMÉTRICO PARA O MÉTODO DE ISOTÉRMICA CILÍNDRICA



A expressão matemática para k é obtida das Equações (1) e (3), esta última transformada em coordenadas cilíndricas (Eckert e Drake, 1959):

$$k = \frac{Q \ln (R_2 / R_1)}{2 \pi L (T_1 - T_2)} \quad (4)$$

O método é usado para líquidos e o aperfeiçoamento do equipamento foi descrito por Tait e Hills (1964). Tem a desvantagem que, devido ao espaço anular, a diferença de temperatura deve manter-se baixa para prevenir a convecção. Encontrou-se um erro de 2% ao assumir um mecanismo integralmente de convecção; para evitar este efeito, se recomenda usar uma delgada capa de fluído e uma diferença de temperatura de 1°F, quando possível (Woodams e Nowrey, 1968).

2 - Isotérmica plana. Também chamado método de placas paralelas. Aqui o material em estudo é colocado entre duas placas horizontais, esta configuração reduz a convecção através da camada do fluído ao mínimo; a placa superior é aquecida e a inferior esfriada a temperaturas constantes. Cuidados devem ser tomados através de um adequado isolamento e uma proteção térmica, que reduza ao mínimo o calor perdido pela placa superior em outros sentidos.

Assumindo, que a substância em estudo é perfeitamente isotrópica (fluxo unidirecional), pode-se integrar as Equações (1) e (3) (Eckert e Drake, 1959), dando:

$$k = \frac{Q L}{A (T_1 - T_2)} \quad (5)$$

onde A é a área da secção plana em contacto com o material, L é a espessura do material entre as placas. A quantidade de calor Q , fornecida à placa, é determinada baseada em dados de aquecimento; atualmente existem

medidores diretos de calor especialmente desenhados (Hill, Leitman e Sunderland, (1967)).

Este método, é amplamente usado, para a medida da condutividade térmica, durante e depois da liofilização dos alimentos; devido a sua importância será discutido em capítulo posterior.

O método de placas paralelas foi usado para alimentos frescos e congelados como bife, porco, vitela, carneiro, por Hill, Leitman e Sunderland (1967). Eles estudaram a variação da condutividade térmica com o conteúdo de umidade e porcentagem de gordura (ver tabelas).

Além disso, com este método, concluíram que acima do ponto de congelamento o valor de k incrementa com a temperatura, e abaixo diminui.

Dentre os métodos do estado estacionário, este é o mais usado, embora não seja ideal do ponto de vista de fluxo de calor, porque o fato de assumir o fluxo em uma só direção não é verdadeiro na prática e as isotérmicas são desviadas sensivelmente em outras direções, mesmo utilizando-se os melhores isolamentos. Podem ser empregados para sólidos, líquidos e fluídos pastosos. Uma versatilidade de seu uso para líquidos está descrita no artigo de Tait e Hills (1964).

3 - Isotérmica esférica. Empregam-se duas esferas colocadas concentricamente; com o fluído colocado no espaço anular resultante; a esfera interna é aquecida elétricamente e a externa é resfriada com água, a temperatura do fluído nas superfícies é registrada com pares termoeletrônicos.

A solução simultânea das Equações (1) e (3), esta última transformada em coordenada esférica (Eckert e Drake 1959, e Reidy 1971); resulta:

$$k = \frac{Q (R_2 - R_1)}{\sqrt{A_2 A_1} (T_1 - T_2)} \quad (6)$$

Onde A_1, A_2 representam as áreas superficiais do espaço anular esférico e R_1, R_2 são os raios das esferas concêntricas.

Embora o método da isotérmica esférica possa eliminar erros de distribuição de calor, sua aplicação em líquidos (Tait e Hills 1964) introduz a necessidade de um suporte mecânico e a colocação geométrica exata da esfera interna. Devido a estas dificuldades este método quase não é utilizado.

4 - Vantagens, desvantagens e fontes de erro do método estacionário. Entre as vantagens do regime estacionário temos:

- (a) Apresenta uma simples solução matemática, sempre que o fluxo de calor for unidirecional; pois assim a Equação (2) fica reduzida a uma equação diferencial ordinária de segunda ordem e grau um.
- (b) É conveniente para líquidos, para alimentos desidratados em pó e em grãos ou outra forma sólida;
- (c) A magnitude do erro devido às isotérmicas não lineares pode ser computada quantitativamente para o método de placas paralelas (Reidy 1971).
- (d) Pode-se utilizar pequenas amostras como teste.

Consideram-se, como desvantagens:

- (a) O fato de que não pode ser aplicado satisfatoriamente a alimentos semi-sólidos, cuja porcentagem de umidade seja maior que 10% (Reidy 1971), porque um longo período de aquecimento produziria uma desidratação do produto, modificando sua verdadeira composição.
- (b) O método requer muito tempo para a experiência (mais de 1 hora)
- (c) Os erros devidos a resistência de contacto entre a superfície metálica e amostra são grandes.
- (d) Há dificuldades para dimensionar a amostra para a forma esférica e cilíndrica.

- (e) Há perdas de calor especialmente nas placas paralelas e no cilindro concêntrico.

Dentre os fatores principais, que podem causar erro no procedimento para determinar a condutividade térmica, pelos métodos mencionados teremos:

- (a) A medida do fluxo de calor.
- (b) Medida da área de teste
- (c) Medida da temperatura
- (d) Migração de umidade através da amostra, que tem alto teor de umidade.
- (e) Uso de amostra em pedaços para um teste criando resistências internas a medida que o calor flui.
- (f) Resistência superficial da amostra
- (g) Transferência de calor por convecção.
- (h) Perda de calor por radiação
- (i) Heterogeneidade da amostra

B. Métodos do Estado não Estacionário

A condição fundamental para o estado não estacionário é que o valor pontual da $(\partial T / \partial \theta)$ seja diferente de zero e a solução das Equações (1) e (2) é agora complexa. Explicaremos duas técnicas a primeira das quais, é mais conhecida e usada.

1 - Técnica da Linha Fonte ("Source Line Technique").

Para compreensão do método, usaremos como guia uma recente publicação de Qashou, Nix, Vashon e Lowery (1970). O diagrama geral do equipamento é mostrado na Figura 2.

A amostra cilíndrica é colocada em um recipiente da mesma forma, os terminais do cilindro devem estar isolados; um arame como resistência elétrica é colocado no eixo maior e um par termoeletrico é colocado no ponto médio do eixo do cilindro.

A solução das equações (1) e (2), para computar o valor de k é dada por Qashou, Nix, Vashon, Lowery (1970) e Dickerson (1965):

$$k = \frac{Q \ln (\theta_2/\theta_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)} \quad (7)$$

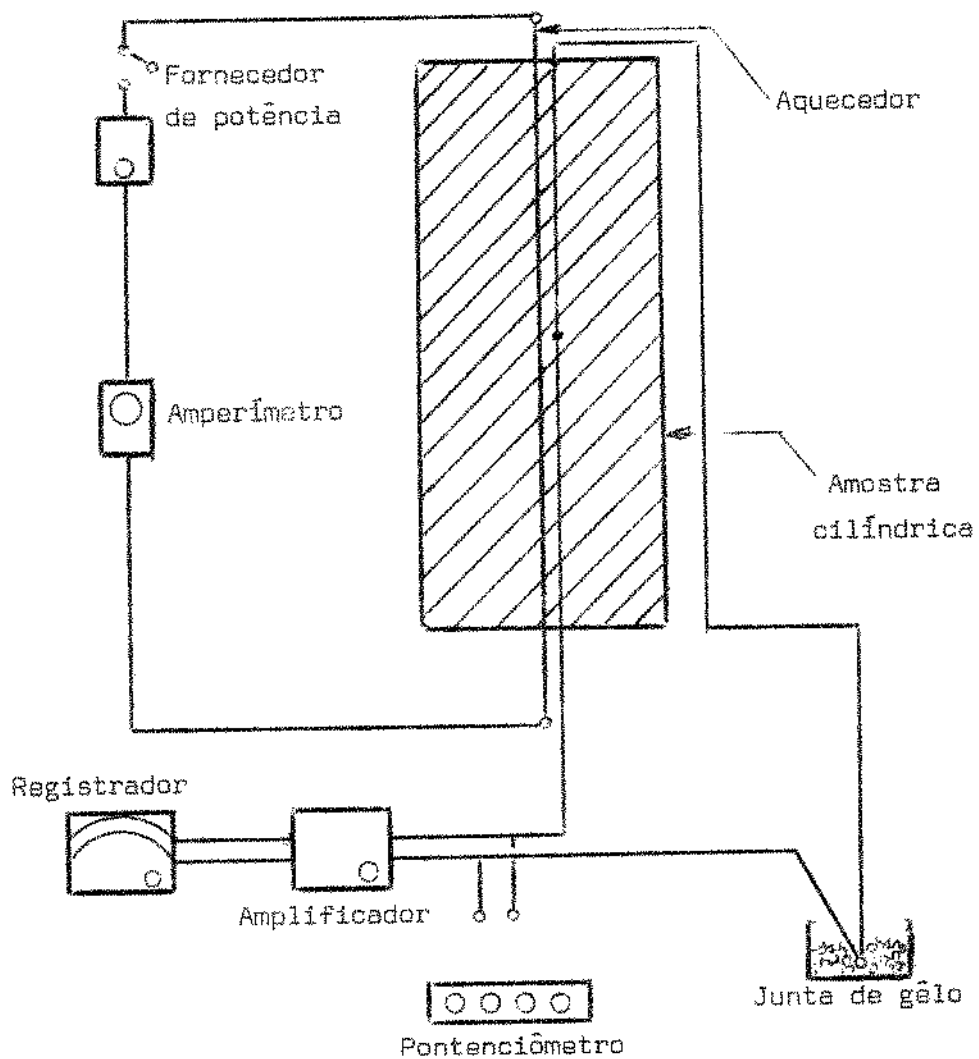
onde Q é a quantidade de energia fornecida à resistência elétrica.

No trabalho experimental, se tomam as leituras de tempos versus a elevação de temperatura, com as quais constroem-se um gráfico (semi-logaritmico), obtendo-se uma linha reta como na Figura 3 a partir da qual se obtém os dados necessários para encontrar o valor de k. A equação (7) mostra, que a energia fornecida à resistência deve ser dissipada pela amostra, nas proximidades do arame; portanto a temperatura da amostra em torno do aquecedor dependerá do modo de conduzir o calor.

O método é considerado altamente prático por sua curta duração, que produz uma pequena variação de temperatura sem perigo de danificar o material biológico. Dickerson (1965) utilizou este método para alimentos enlatados, e em uma posterior publicação de Dickerson e Read (1968) usaram a mesma técnica, para determinar a condutividade de uma maionese de batatas.

FIGURA 2

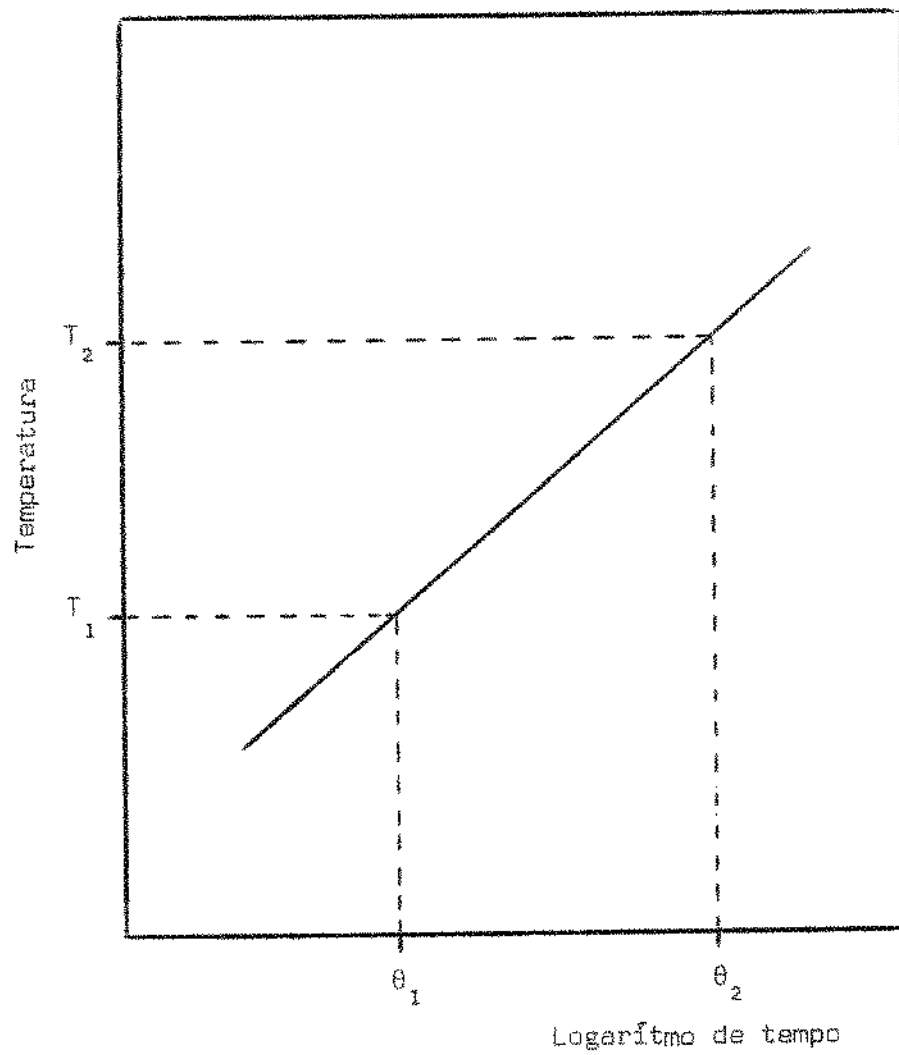
DIAGRAMA BÁSICO PARA O MÉTODO "SOURCE LINE TECHNIQUE"



Extraído de Qashou, Nix, Vachon e Lowery (1970)

FIGURA 3

GRÁFICO EXPERIMENTAL PARA O MÉTODO "SOURCE LINE" TECHNIQUE



Antes do experimento, é necessário uma prova, para determinar a quantidade de corrente elétrica necessária para obter um resultado razoável. Este teste preliminar serve para avaliar a capacidade mecânica do instrumento e determinar a voltagem máxima a ser utilizada, de modo que o material testado não seja danificado (Stolf 1972).

2 - Técnica da Sonda ("Probe Technique"). Este método foi desenvolvido por Morley (1966), o esquema do equipamento é semelhante ao anterior, a diferença consiste em proteger o aquecedor e o par termoeletrico dentro de um bulbo cilíndrico de aço chamado "probe", o qual é introduzido na amostra, o conjunto deve estar protegido em ambiente a temperatura constante. O experimento começa quando o conjunto atingir uma temperatura de equilíbrio.

Uma solução, para o estado não estacionário das equações (1) e (2), é apresentado por Vries e Peck (citado por Morley 1966)

$$\Delta T = \frac{I^2 R}{4 \pi k} \left\{ \ln \left(\frac{1}{x} \right) - 0.5772 + x \left\{ 2 \left(1 - \frac{\alpha k_1}{\alpha_1 k} \right) \left(\ln \left(\frac{1}{x} \right) - 0.5772 \right) + 2 - \frac{\alpha}{\alpha_1} \right\} + \right.$$

+ termos em alta potência de x }

(8)

Onde x é $(Y_0^2 / 4\alpha t)$, Y_0 é o raio do "probe", I é a intensidade da corrente, R é a resistência elétrica por unidade de comprimento do aquecedor; k e k_1 são as condutividades térmicas da amostra e da "probe" respectivamente e α , α_1 são as difusividades térmicas da amostra e "probe" respectivamente.

Depois de certo tempo, x torna-se suficientemente pequeno e a equação (8) se reduz a:

$$\Delta T = \frac{I^2 R}{4 \pi k} \left[\ln \left(\frac{1}{y} \right) - 0.5772 \right] \quad (9)$$

Se colocamos T versus $\ln \theta$, obteremos uma linha reta com declividade G :

$$G = \frac{I^2 R}{4 \pi k} \quad (10)$$

a partir do qual se determina k .

Como o método anterior, este é muito rápido, de modo que com leituras de cinco minutos, pode-se obter uma curva necessária para o cálculo. As simplificações, que foram feitas da equação original, diminuem a precisão do método.

3 - Vantagens, desvantagens e fontes de erro do método não estacionário.

As principais vantagens do método não estacionário são:

- (a) Rapidez na obtenção dos resultados.
- (b) As condições, em que é testada a amostra, se aproximam às condições de processamento.
- (c) É conveniente para alimentos de alto conteúdo de umidade e para alimentos congelados.
- (d) No caso do método "Probe Technique" é conveniente para alimentos "in situ".

Como principais desvantagens teríamos: a dificuldade em resolver as Equações para o estado não estacionário; e uma adequada seleção de condições limites para a integração.

Alguns fatores que causam erros podem ser:

- (a) A medida da temperatura.
- (b) A medida do tempo
- (c) A localização do par termopelétrico.
- (d) A transferência de calor por convecção.
- (e) Uso de amostras heterogêneas ou anisotrópicas.
- (f) Fluxo de calor não linear ou não radial.

C. Indiretos

São métodos, que embora se baseiem no regime não estacionário de fluxo de calor, seu cálculo se faz indiretamente, por medição de outras propriedades térmicas.

1. Método de Difusividade Térmica. A difusividade é uma medida da quantidade de calor absorvido por um material devido a uma variação de temperatura. Matematicamente está definida pelos termos da Equação (11).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (11)$$

onde ρ é a densidade do elemento, C_p sua capacidade calorífica e k a condutividade térmica.

Experimentalmente pode ser determinado com um equipamento simples e por integração da Equação (2) (Dickerson 1955).

Um método recente para encontrar α foi desenvolvido por Hayakawa(1971),

que para a solução das equações (1) e (2) utiliza um programa de compu
tação (FORTRAN IV) com uma considerável economia de tempo.

O método é recomendado em geral para alimentos sólidos como carnes e para
alimentos pastosos como albumine de ovos.

2. Método de Penetração de Calor. O método se resume em resolver a Equa
ção de Ball e Olson (1957):

$$k = \frac{2.303}{f} \frac{\rho C_p}{(\lambda_1 + \mu_1)} \quad (12)$$

onde f é a declividade recíproca negativa da curva de penetração de calor
ou é o tempo para uma parte da linha reta da curva de penetração de ca
lor passe através de um ciclo logarítmico; λ_1 e μ_1 são funções que depend
dem da condutividade térmica k e do coeficiente de transferência de ca
lor h (Ball e Olson 1957); podendo ser representados da seguinte forma:

$$\lambda_1 = g(k, h) \quad (13)$$

$$\mu_1 = g'(k, h) \quad (14)$$

Se estas Equações são substituídas na Equação (12) o resultado é:

$$k = \frac{2.303}{h^2 f} \frac{\rho C_p}{g^2(k) + g'^2(k)} \quad (15)$$

onde a única incógnita é K .

Logo na prática, quando se quer determinar a condutividade térmica de um alimento, é necessário que se conheça: a curva de penetração de calor (tem_p versus logaritmo de temperatura) para obter f , a densidade ρ , o calor específico C_p e o coeficiente de transferência de calor h , que também é obtido da curva de penetração de calor (Charm 1963 a).

A Equação (15) pode ser resolvida por qualquer dos seguintes métodos; o gráfico, ou por tentativas, pode usar-se computador digital. O método só precisa da curva de penetração de calor (obtida experimentalmente) alias útil também para o cálculo da difusividade térmica. Os valores de ρ e C_p podem ser encontrados em tabelas ou ser determinados experimentalmente.

O método é geralmente usado durante um congelamento ou descongelamento.

II. CONDUTIVIDADE TÉRMICA NA LIOFILIZAÇÃO E REFRIGERAÇÃO

Devido a aplicação cada vez maior da liofilização de alimentos como meio de preservação, muita informação tem sido publicada a respeito. Neste capítulo resumimos as maiores contribuições divulgadas na bibliografia, relacionadas especificamente com a dependência de k versus a temperatura, pressão, porosidade e condutividade térmicas individuais do gás e sólido.

Foi detalhado o artigo de Harper (1961), por ser o mais importante, tendo sido tomado como padrão de comparação por pesquisadores posteriores. Também é feita uma análise completa do artigo de Massey e Sunderland (1967), que fornece um método para medir k durante a liofilização.

Na parte final, descreve-se um método Standard da ASTM para alimentos a temperaturas usuais de refrigeração, usado por Lantz (1961), o qual demonstrou a precisão do método por comprovação de uma fórmula utilizada em alimentos congelados.

A . Liofilização

Partindo do fato de que em um processo de liofilização (pressões sub-atmosféricas) as propriedades de transporte não seguem as leis do fluxo contínuo, Harper (1962) foi o primeiro a estudar o movimento do vapor e o fluxo de calor. Considerou, que o fluxo do fluido se deve aos mecanismos de difusão Knudsen e fluxo hidrodinâmico, enquanto que a condutividade térmica dos gases em meios porosos dependia da condutividade individual do gás e da geometria do sistema poroso. Os efeitos de radiação não foram levados em conta.

No seu primeiro artigo, Harper estudou a variação de k dos gases nos meios porosos dos produtos liofilizados em função da pressão, desenvolvendo inicialmente uma relação semi-teórica da seguinte forma:

$$\frac{k_g}{K_{go}} = \frac{1}{1 + C/P} \quad (16)$$

k_{go} e k_g são as condutividades térmicas do gás livre e do gás no sólido poroso respectivamente; C é uma constante, que depende da porosidade e P é a pressão.

Usou um método experimental para comprovar a validade da relação anterior. A técnica empregada baseia-se no método das placas paralelas; uma amostra liofilizada (bife, maçã ou ervilha) foi colocada entre elas e o conjunto foi fechado em uma câmara de vácuo com pressão regulável. Os valores de k_g versus a variação de pressão (entre 0 e 760 mmHg) foram graficados, por outro lado os valores calculados pela relação de Harper foram levados ao mesmo gráfico, para isto o valor da constante C foi escolhida de maneira que se adapte a um dado experimental. O valor de k_{go} foi tomado como a diferença entre os valores de alta e baixa pressão (0 mm Hg). O procedimento estrito, para encontrar k_{go} com a Equação (16), consistiria em calcular experimentalmente C e k_{go} para o que são necessários dados adicionais; mas devido a extraordinária coincidência de ambos resultados posta em evidência em um só gráfico, demonstrou-se a relação de Harper junto com a metodologia empregada. Estes resultados fornecem útil informação para aplicação direta a problemas de liofilização. Além disso em seu experimento Harper mediu a porosidade do produto seco, fez também observações de caráter empírico no sentido de que em materiais de alta porosidade e baixa condutividade de sólido, a soma desta condutividade com a condutividade térmica do gás, que ocupa o espaço poroso representa a condutividade total chamada efetiva k_e .

Em trabalho posterior Harper e El Sahrigi (1964) comprovaram experimentalmente tal afirmação empírica. A condutividade térmica efetiva foi calculada pelo método usado em seu experimento anterior com ligeiras modificações. Comprovou também que k_e diminui de um valor constante a altas pressões (próximas à atmosférica); a um valor inferior a baixas pressões (abaixo de 0.1 mmHg). Seus experimentos foram realizados com diferentes gases atmosféricos, sendo usado para tais, amostras de maçã, pêra e bife liofilizados.

Um estudo teórico-prático detalhado entre a condutividade térmica e a porosidade de um produto liofilizado foi pesquisado por Stuart e Closset (1971), os quais usaram uma amostra de bife. Para eles as condutividades estão relacionados da seguinte forma:

$$k_e = k_s + \phi (k_g - k_s) \quad (17)$$

onde k_e e k_s são as condutividades térmicas efetiva e do sólido poroso respectivamente, e k_g é a condutividade do gás no espaço poroso (medida a 0 mmHg). Baseados em dados de secagem e usando a Equação (17) encontraram a condutividade térmica efetiva. Estes valores foram comparados com os dados obtidos por Harper (1962), mostrando uma boa aproximação.

Uma pesquisa detalhada e extensa, para estudar os fatores, que influenciam na velocidade de transmissão de calor na liofilização, foi publicada, por Triebes e King (1966). O equipamento empregado para o experimento é o chamado "guarded hot plate", baseado no método das placas paralelas, embora a montagem e as precauções tomadas, para simular, o modelo da isotérmica plana, foram altamente sofisticadas em detalhes, assegurando deste modo a fidelidade dos resultados; a partir deles se concluiu, que a condutividade efetiva da amostra (peru) incrementa-se de duas maneiras com o aumento de pressão (entre 0 e 760 mmHg), ou com o aumento da condutividade térmica do gás que ocupa o espaço poroso. Não foi evidenciado efeito nenhum com o aumento de temperatura; enquanto que aumentando a umidade relativa do gás nos poros, aumenta k efetiva; finalmente Triebes e King verificaram um acentuado efeito da orientação da fibra do produto sobre a velocidade de condução de calor no sentido de que a velocidade é maior, quando a direção do fluxo é paralela a fibra e menor quando o fluxo é normal a mesma.

Embora os autores acima citados não tivessem encontrado variação da condutividade efetiva com a temperatura, estudos de Saravacos & Pilsworth (1965) demonstraram uma relação linear direta (quase na mesma faixa de

temperatura), quando calculam condutividades térmicas de alimentos em estado gel tais como: amido, gelatina gel, pectina, celulose, goma e albumem de ovos. Eles usaram o equipamento " guarded hot plate" de alta precisão.

A aparente contradição dos autores demonstra, que não pode ser desenvolvido um método geral para estudar a variação das propriedades dos alimentos e porisso devem ser feitas determinações experimentais isoladas.

A medição da condutividade térmica, durante a liofilização, foi estudada em amostras de peixes por Lusk, Karel e Goldblith (1964) e de bife por Massey e Sunderland (1967) cujo experimento será descrito a seguir.

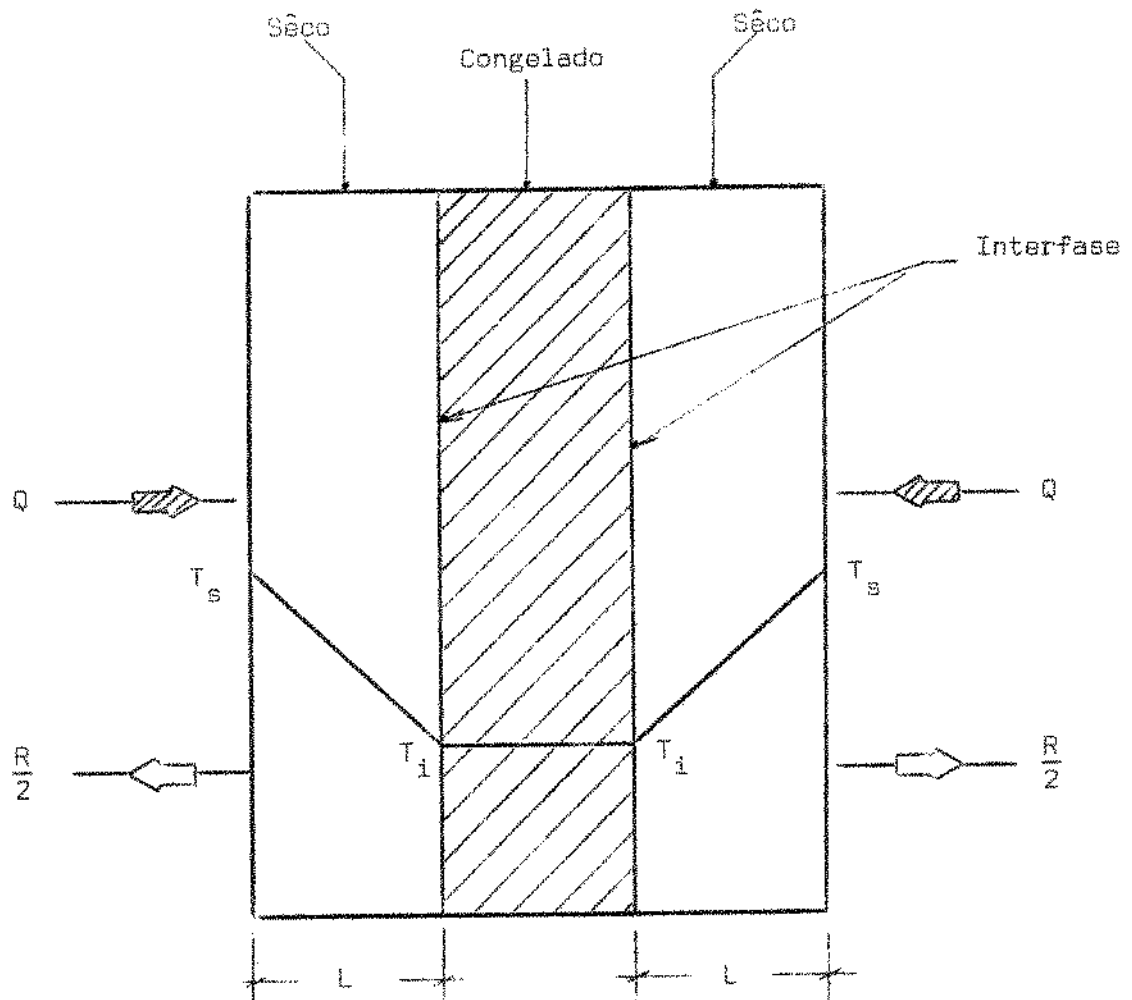
Uma amostra de bife foi colocada entre placas paralelas verticais aquecidas; o conjunto foi posto em uma câmara de vácuo controlado, uma balança de precisão foi adaptada para medir o peso da amostra durante a sublimação; pares termoeletrônicos foram colocados na superfície e no centro da amostra. Assumiu-se o modelo da Figura 4 para o estudo da condutividade térmica. Massey e Sunderland apresentaram a expressão para o fluxo de calor que flui a interfase:

$$Q = \frac{2 k A (T_s - T_i)}{L} - R \int_{T_i}^{T_s} C_p dT \quad (18)$$

onde k é a condutividade térmica da região seca, R é o fluxo total de vapor devido a sublimação. A Equação anterior representa o seguinte equilíbrio de energia:

FIGURA 4

MODELO DE MASSEY E SUNDERLAND PARA O ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA
NA LIOFILIZAÇÃO



$$\left[\begin{array}{c} \text{Fluxo de calor} \\ \text{que flui para} \\ \text{interfase} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Calor de condução} \\ \text{da superfície que} \\ \text{flui para interfa} \\ \text{se.} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{absorvida} \\ \text{pelo vapor} \end{array} \right]$$

Um equilíbrio de matéria fornece:

$$W = 2 A L \rho_s (m_i - m_f) \quad (19)$$

onde m_i e m_f são as unidades iniciais e finais por unidade de peso do produto, ρ é a densidade da região seca.

Por outro lado o fluxo total de calor que flui a interfase é:

$$Q = R \Delta s \quad (20)$$

onde s é o calor de sublimação. Combinando as equações (18), (19) e (20) resulta para k :

$$K = \frac{W R \Delta s + \int_{T_i}^{T_s} C_p dT}{4 A \rho_s (m_i - m_f) (T_s - T_i)} \quad (21)$$

Para o procedimento experimental, o calor específico pode ser tomado como a média, a unidade final é considerada zero, com ajuda da balança, obtêm-se dados para a construção de um gráfico: fluxo de vapor versus diferença de temperatura dividido pela perda de peso como indica a Figura 5, a declividade da reta nos fornece $(RW)/(T_g - T_f)$; logo fazendo uso da Equação (21), podemos calcular experimentalmente o valor de k.

Este método tem boa precisão, pois considera a transmissão de energia por convecção devido ao movimento do vapor da interfase que flui para a superfície livre. Foram Lusk, Karel e Goldblith (1964), os quais num trabalho anterior usaram o mesmo equipamento para o cálculo de k do salmão, merluza e perca, porém eles não consideram o calor por convecção do vapor e o erro por desprezar este efeito foi de 2,5 a 3,5 % (Citado por Keppeler e Cowart 1972).

Grande exatidão pode ser obtida, conhecendo o verdadeiro calor de sublimação do produto e a lei de variação de calor específico na camada sêca.

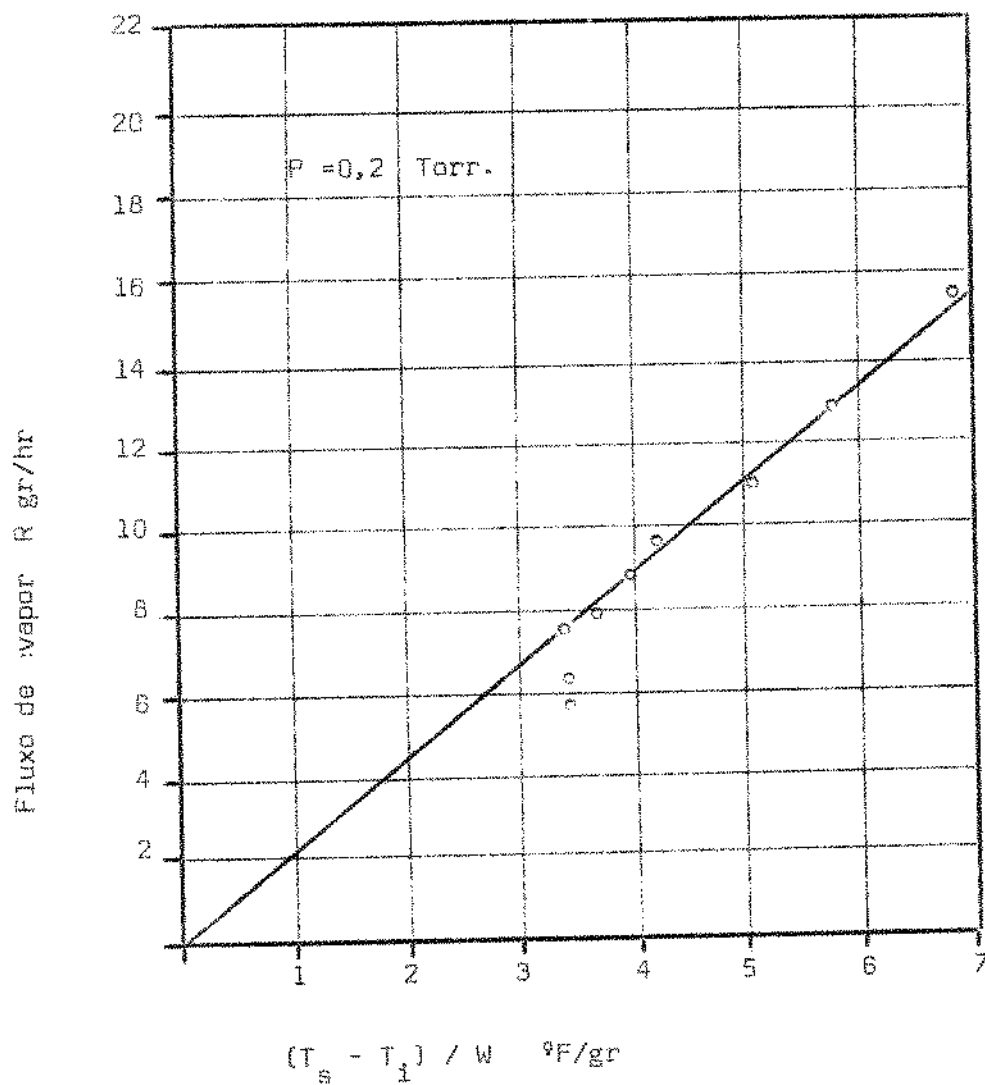
B. Refrigeração

Lentz (1961) contribuiu no estudo da condutividade térmica a temperaturas usuais de refrigeração de alimentos. Sua técnica experimental baseou-se no método original da ASTM Standards (1955), cuja estrutura fundamental consiste em três placas dispostas em paralelo como na Figura 6 isola das da melhor forma possível, para que a direção do fluxo de calor seja uniforme sobre a área de prova e perpendicular à superfície da amostra, todo o conjunto deve estar submerso, em um banho a temperatura constante. A faixa de temperatura de experimento foi de 5 a -30°C , as amostras empregadas para o estudo foram: carne (peixe, peru), gorduras e gels: leves modificações foram introduzidas no modelo original da ASTM.

O experimento de Lentz empregando uma mistura de gelatina com gelo, demonstrou que k é diretamente proporcional à temperatura (entre 10 e -25°C).

FIGURA 5

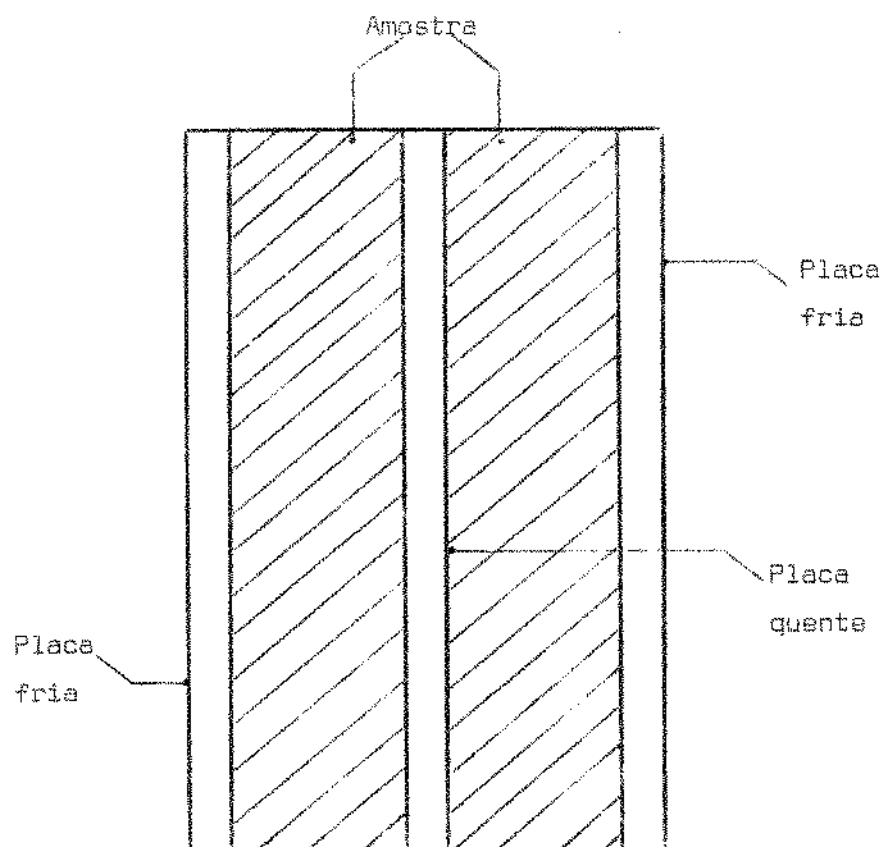
GRÁFICO EXPERIMENTAL PARA ENCONTRAR K DURANTE A LIOFILIZAÇÃO



Extraído de Massey e Sunderland (1967)

FIGURA 6

DIAGRAMA BÁSICO DA ASTM PARA DETERMINAR k



Seus resultados confirmaram a validade da Equação (22) de Maxwell - Eucken (citado por Lentz 1961) para alimentos congelados ou parcialmente congelados revelando a boa precisão do método usado.

$$k = k_c \frac{1 - (1 - a \frac{k_d}{k_c})^b}{1 + (a - 1) b} \quad (22)$$

k representa a condutividade térmica da mistura da fase contínua e dispersa.

$$a = 3 k_c / (3 k_c + k_d) \quad (23)$$

$$b = V_d / (V_c + V_d) \quad (24)$$

V_c e V_d são os volumes da fase contínua e dispersa respectivamente.

Outra contribuição nas operações a baixas temperaturas Lusk, Karel e Goldblith (1964) computaram condutividade térmica de carnes congeladas (entre 0 e -25°C) como salmão, bife, porco, peru e bacalhau, encontram uma relação linear com a temperatura abaixo de -10°C. Uma valiosa conclusão desta experiência demonstrou a dependência da orientação da fibra da amostra com o fluxo de calor; a condução foi de 15 a 30% maior ao longo da fibra, que no sentido perpendicular a ela.

Triebes e King (1966) chegaram a mesma conclusão posteriormente. Estas contribuições de natureza altamente prática tiveram imediata aplicação.

III. TABELA DE VALORES

Material	Temp. °F	Condutividade Térmica		Referência
		Sistema Inglês BTU/hrft²F	Sistema Internacional J/mseg²F	
A	B	C	D	E
AÇUCARES				
Solução glicose	10,1	34,7	0,312	Riedel (1949)(a)
		68,0	0,327	
		122,0	0,347	
		176,0	0,370	
	20,1	34,7	0,294	
		68,0	0,309	
		122,0	0,330	
		176,0	0,346	
	30,1	34,7	0,276	
		68,0	0,292	
		122,0	0,311	
		176,0	0,325	
	39,9	34,7	0,258	
		68,0	0,272	
		122,0	0,290	
		176,0	0,306	
Solução sacarose	10,0	32,0	0,309	
		50,0	0,318	
		68,0	0,327	
		86,0	0,336	
		104,0	0,343	

A	B	C	D	E
20,0	122,0	0,350	0,608	
	140,0	0,356	0,616	
	158,0	0,363	0,628	
	176,0	0,368	0,637	
	32,0	0,292	0,504	
	50,0	0,300	0,519	
	68,0	0,309	0,535	
	86,0	0,316	0,547	
	104,0	0,324	0,561	
	122,0	0,330	0,571	
	140,0	0,336	0,582	
	158,0	0,342	0,592	
	176,0	0,347	0,601	
	32	0,274	0,474	
	50	0,282	0,485	
	68	0,289	0,500	
30,0	86	0,297	0,514	
	104	0,304	0,526	
	122	0,310	0,537	
	140	0,316	0,547	
	158	0,321	0,556	
	176	0,325	0,563	
	32	0,256	0,443	
	50	0,264	0,457	
	68	0,272	0,471	
	86	0,277	0,479	
	104	0,284	0,492	

A	B	C	D	E
	122	0,290	0,502	
	140	0,296	0,512	
	158	0,300	0,519	
	176	0,304	0,526	
50,0	32	0,328	0,568	
	50	0,246	0,426	
	68	0,252	0,436	
	86	0,259	0,448	
	104	0,264	0,457	
	122	0,270	0,467	
	140	0,276	0,478	
	158	0,280	0,486	
	176	0,284	0,492	
CARNES				
Carne de cavalo				
Q 1(b).	86	0,254	0,439	Charm(1963b)
Carne de baleia,75%				
Água	64,4	0,128	0,221	
Bife,74,5% água,01	32	0,275	0,476	
	23	0,538	0,931	
	14	0,690	1,194	
	-4	0,826	1,429	

A	B	C	D	E
Bife, 76,5% água, Q1	32	0,275	0,476	Lentz(1981)
	23	0,610	1,055	
	14	0,778	1,346	
	-4	0,908	1,568	
Bife magro (costas), 74% água, 3,4% gor dura Q 1	36,5	0,279	0,483	
	32,0	0,278	0,481	
	23,0	0,588	1,017	
	14,0	0,616	1,066	
	-4,0	0,675	1,158	
Bife magro (lombo), 75% água, 0,9% gor dura, Q 11 (c)	43	0,300	0,519	
	35	0,290	0,502	
	32	0,284	0,492	
	23	0,742	1,284	
	14	0,729	1,371	
	-4	0,904	1,564	

A	B	C	D	E
Bife (ubre), 9% água, 89% gordura, Q 1	23	0,166	0,287	
	14	0,148	0,256	
Bife magro, 78,5% água, Q 1	32	0,277	0,479	Cherneeva
	23	0,612	1,059	(1956) citado por
	14	0,778	1,348	Lentz (1961)
	-4	0,907	1,570	
Bife gorduro- so, 74,5% água Q 1	32	0,277	0,479	
	23	0,637	0,929	
	14	0,682	1,197	
	-4	0,827	1,431	
Bife gorduro- so, 7% água, Q 1	32	0,118	0,204	
	23	0,122	0,211	
	14	0,131	0,226	
	-4	0,141	0,344	
Bife, 69,5% água	0	0,630	1,090	Miller e
	5	0,620	1,073	Sunderland
	10	0,610	1,055	(1963) (a)
	15	0,600	1,038	

A	B	C	D	E
	20	0,590	1,021	
	25	0,580	1,003	
	30	0,520	0,900	
	32	0,160	0,277	
	35	0,170	0,294	
	40	0,180	0,331	
Bife de rins, 69,5% água, Q 11	42	0,185	0,320	Miller e
	37	0,080	0,312	Sunderland
	24	0,590	1,021	(1963)
	17	0,600	1,038	Citado por
	10	0,610	0,056	Hill, Leitman e
	2	0,620	1,070	Sunderland (1967)
Bife magro enlatado 78,8% água, 0,8% gor- dura , Q 1	8,7	0,769	1,331	
	18,4	0,716	1,243	
	44,5	0,275	0,476	
	74,4	0,276	0,481	
	97,3	0,270	0,467	
	143,7	0,281	0,486	

A	B	C	D	E
Bife magro enlatado 78,7% água, 1,4%gordura, Q 11	11,3 19,6 46,2 63,4 89,8 141,6	0,806 0,757 0,249 0,258 0,251 0,256	1,395 1,310 0,431 0,429 0,434 0,443	Leitman e Sunderland (1967)
Bife magro enlatado 76,5% água, 2,35%gordura, Q 11	0,3 13,0 18,4 22,9 37,5 46,5	0,796 0,750 0,701 0,690 0,230 0,232	1,377 1,296 1,213 1,184 0,398 0,401	
Bife magro enlatado 78% água, 3% gordura Q 1	3,6 17,0 16,5 18,9	0,647 0,632 0,635 0,628	1,119 1,093 1,099 1,087	

A	B	C	D	E
	24,6	0,583	1,000	
	36,3	0,252	0,436	
	42,1	0,255	0,441	
	45,8	0,256	0,443	
	46,3	0,257	0,444	
Bife (lombo)	56,2	0,750	1,300	Morley (1966)
	60,6	0,297	0,515	
Bife (peito)	60,6	0,288	0,509	
Porco (lombo)	60,6	0,297	0,517	
	-2,2	1,040	1,800	
Carneiro(Lombo)	-2,2	1,020	1,770	
Bife (lombo com gordura)	60,6	0,120	0,208	
	-2,2	0,155	0,268	
Bife rins	98,5	0,108	0,187	
	60,6	0,108	0,187	
	33,8	0,110	0,190	
Bife de pescoço				
Densidade				
59,5lb/ft ³	43,1	0,235	0,407	Quashou (1970)
60,0lb/ft ³	38,4	0,253	0,438	
Porco magro, 76,8%				
água Q 1	32	0,276	0,478	Chernieva (1956)Citado por Lentz (1961)
	23	0,443	0,767	
	14	0,571	0,988	

A	B	C	D	E
	-4	0,745	1,289	
Porco magro (pernil)				
72% água, 6,1% gordura				
ra Q 11	40,1	0,286	0,460	Lentz (1967)
	20,3	0,700	1,212	
	-2,2	0,761	1,317	
	-9,4	0,789	1,360	
Porco magro(pernil),				
72% água, 6,1% gordura				
ra, Q 11	39,2	0,290	0,502	
	16,7	0,822	1,423	
	-2,7	0,895	1,549	
	10,3	0,919	1,591	
Porco magro(pernil),				
75,9% água 6,7% gordura , Q1	6,2	0,750	1,298	Leitman e Sunderland (1967)
	13,0	0,737	1,275	
	17,4	0,738	1,277	

A	B	C	D	E
	42,8	0,282	0,488	
	46,9	0,286	0,495	
	70,6	0,293	0,507	
	112,7	0,305	0,529	
	138,8	0,312	0,540	
Porco magro (pernil), 75,1% água, 7,8% gordura, Q 11	8,2	0,823	1,425	
	12,8	0,800	1,384	
	21,3	0,745	1,289	
	23,6	0,730	1,263	
	38,8	0,256	0,443	
	43,0	0,261	0,452	
	66,2	0,262	0,453	
	109,3	0,280	0,485	
	141,3	0,283	0,489	
Carne de carneiro magro(pernil), 71,8% água, 8,7% gordura Q 11	5,6	0,650	1,125	
	11,8	0,623	1,078	
	17,0	0,607	1,051	
	23,9	0,590	1,021	

A	B	C	D	E
	41,6	0,280	0,450	
	51,0	0,259	0,448	
	93,6	0,271	0,469	
	11,6	0,271	0,469	
	142,0	0,276	0,478	
Carneiro de carnei				
ro (pernil) 71%				
água, 9,6% gordura				
Q 11	6,0	0,735	1,272	
	10,1	0,730	1,263	
	19,3	0,689	1,192	
	24,6	0,678	1,175	
	42,0	0,240	0,415	
	750,8	0,226	0,391	
	87,4	0,236	0,408	
	119,3	0,243	0,421	
	142,6	0,244	0,422	
Vitela magra				
(pernil), 75% água				
2,1% gordura, Q 1	14,8	0,750	1,296	
	18,0	0,738	1,277	
	24,3	0,708	1,225	
	42,6	0,275	0,476	
	50,0	0,259	0,448	

A	B	C	D	E
	103,0	0,276	0,478	
	125,6	0,262	0,488	
	144,4	0,283	0,448	
Vitela magra (pernil), 75% água, 2,1% gordu ra, Q 11	8,2	0,835	1,817	
	13,8	0,814	1,409	
	20,8	0,773	1,338	
	23,6	0,762	1,319	
	40,4	0,255	0,441	
	47,2	0,260	0,450	
	74,6	0,258	0,446	
	106,4	0,254	0,439	
	138,9	0,261	0,452	
Carne de Coelho	98,6	0,290	0,501	
Bife liofilizado				
Pressão (mmHg)				
1000		0,037	0,065	Harper
100,		0,037	0,054	(1962)
10,		0,035	0,061	
1,0		0,028	0,048	
0,4		0,024	0,041	
0,1		0,023	0,039	

A	B	C	D	E
0,04		0,022	0,038	
0,01		0,022	0,038	
0,001		0,022	0,037	
Bife liofilizado a				
diferentes atmosferas				
Freon - 12				
Pressão (mmHg)				
0,019		0,021	0,037	Harper e El Sahrigi (1964)
0,055		0,022	0,039	
0,128		0,022	0,039	
0,240		0,023	0,040	
0,570		0,024	0,042	
1,100		0,025	0,044	
2,250		0,026	0,045	
4,800		0,027	0,047	
16,600		0,028	0,049	
38,000		0,029	0,050	
125,000		0,029	0,050	
301,000		0,029	0,050	
760,000		0,029	0,050	
CO ₂				
Pressão (mmHg)				
0,021		0,022	0,038	

A	B	C	D	E
0,051		0,022	0,038	
0,105		0,022	0,038	
0,205		0,023	0,040	
0,470		0,025	0,043	
1,000		0,026	0,045	
2,480		0,027	0,048	
5,300		0,029	0,050	
10,400		0,030	0,052	
19,500		0,021	0,054	
60,000		0,032	0,056	
140,000		0,032	0,056	
340,000		0,032	0,056	
760,000		0,032	0,056	
Nitrogênio				
Pressão (mmHg)				
0,005		0,022	0,038	
0,007		0,022	0,038	
0,013		0,022	0,038	
0,023		0,022	0,038	
0,051		0,022	0,038	
0,104		0,023	0,039	
0,220		0,024	0,042	
0,410		0,026	0,045	
0,840		0,028	0,048	
1,670		0,029	0,051	

A	B	C	D	E
3,100		0,032	0,055	
5,300		0,033	0,057	
11,000		0,035	0,061	
20,000		0,037	0,064	
57,000		0,038	0,065	
112,000		0,038	0,065	
250,000		0,038	0,065	
760,000		0,038	0,065	
Hidrogenio				
Pressão (mmHg)				
0,005		0,022	0,037	
0,007		0,022	0,037	
0,113		0,022	0,037	
0,019		0,022	0,037	
0,046		0,023	0,038	
0,096		0,024	0,041	
0,207		0,027	0,047	
0,480		0,033	0,057	
0,970		0,042	0,073	
2,100		0,053	0,092	
5,200		0,065	0,113	
11,500		0,075	0,121	
23,500		0,084	0,146	
53,000		0,096	0,166	
125,000		0,109	0,188	

A	B	C	D	E
260,000		0,115	0,199	
760,000		0,115	0,199	
Bife liofilizado				
Pressão (mmHg)				
0,2		0,023	0,039	
0,5		0,025	0,044	
0,9		0,027	0,046	
1,5		0,029	0,050	
2,5		0,330	0,052	
3,0		0,032	0,055	
Carne de peru lio-				
filizada, Q 11				
Pressão m(mmHg)				
10-1000		0,04	0,069	Triebes e
0,01-0,1		0,02	0,035	King (1966)
		0,255	0,044	Walters
Galinha (musculo)	40-80	0,014	0,024	(1963)
Galinha (pele)	40-80			
Peru (peito) 74%				
água, 2,1% gordura,				
Q 11	-13	0,968	1,676	Lentz (1961)

A		B	C	D	E
		5	0,883	1,528	
		14	0,847	1,466	
		23	0,798	1,381	
		37	0,302	0,523	
Peru (coxa), Q 1		-13	0,871	1,508	
		-4	0,835	1,445	
		14	0,762	1,319	
		23	0,702	1,121	
		37	0,290	0,502	
Peru (peito), Q 1		-13	0,762	1,319	
		-4	0,738	1,277	
		5	0,702	1,215	
		14	0,677	1,172	
		23	0,641	1,109	
		37	0,290	0,502	
FRUTAS					
Suco de maçã					
Índice	Conc. %				
de re	pêso				
fração	seca				
	por 100				
	g. sol.				
1,351	12,6	68	0,323	0,569	Riedel
1,351	12,6	176	0,364	0,630	(1949) (a)

A		B	C	D	E
1,380	29,8	68	0,392	0,678	
1,382	29,8	176	0,328	0,564	
1,448	64,0	68	0,225	0,389	
1,448	64,0	176	0,252	0,436	
Suco de pêra					
1,355	15,3	68	0,318	0,550	
1,355	15,3	176	0,364	0,630	
1,398	39,6	68	0,275	0,476	
1,398	39,6	176	0,308	0,533	
1,441	61,0	68	0,232	0,401	
1,441	61,0	176	0,258	0,446	
Suco de uva					
1,349	--	68	0,328	0,566	
1,349	--	176	0,370	0,640	
1,384	--	68	0,287	0,497	
1,384	--	176	0,321	0,556	
1,445	--	68	0,224	0,396	
1,445	--	176	0,254	0,439	
Uvas passas					
Densidade aparente					
36 lb/ft ³		28 - 11,6	0,16	0,277	Smith (1952)
39 "		35 - 6,6	0,16	0,329	(a)
Morango					
Densidade aparente					
50 lb/ft ³		2,6 - 10	0,649	1,123	

A	B	C	D	E
40 lb/ft ³	2,4 - 8,0	0,310	0,537	
30 "	5,0 - 5,4	0,340	0,568	
Ameixa japonesa				
Densidade				
aparente				
3,8 lb/ft ³	3 - 6,8	0,140	0,242	
Pomelo (suco)	32 - 59	0,230	0,398	Gane (1936)
Laranja (suco)	32 - 59	0,240	0,415	(a)
Pêssego	0 - 80	0,650	1,125	
GRÃOS				
Arroz com casca, umi				
dade média 12,7%	122	0,404	0,699	Dua e Ojha
	124	0,445	0,770	(1969) Citado
	126	0,362	0,627	por Stolf
	139	0,387	0,635	(1972)
	142	0,425	0,736	
	152	0,458	0,793	
	158	0,440	0,762	
Arroz sem casca, umi				
dade média 12%	124	0,775	0,822	
	130	0,495	0,856	
	144	0,485	0,836	
	148	0,508	0,878	
	156	0,522	0,903	
	158	0,495	0,856	

A	B	C	D	E
Arroz brunido, umi dade média 13,4%	126	0,533	0,923	
	131	0,570	0,987	
	137	0,542	0,938	
	140	0,588	1,018	
	158	0,555	0,961	
	160	0,592	1,025	
Trigo vermelho "spring", umidade me dia M	68,0	(80,8 + 0,812M)*	Para obter va loras neste	Chendra (1971)
	41,0	(80,8 + 0,550M)*	sistema multi plicar por	
	33,8	(78,8 + 0,785M)*	1,731	
	21,2	(57,6 + 0,888M)*		
	1,4	(81,8 + 0,542M)*		
	-14,0	(83,0 + 0,550M)* *multipli car por 10 ⁻³		
Café	70,0	0,100	0,173	Silvetz e
Milho amarelo 13,2%				Elliot(1963)
água	104,0	0,052	0,090	
Aveia, 8,9% água	0-104	0,037	0,064	Bakke (1955)
Aveia, 31,8% água	0-104	0,053	0,092	(a)

A	B	C	D	E
GORDURAS				
Manteiga	-13	0,097	0,168	Lentz (1961)
	-4	0,097	0,168	
	5	0,097	0,168	
	14	0,097	0,168	
	23	0,097	0,168	
	32	0,097	0,168	
	41	0,097	0,168	
	50	0,097	0,168	
Gordura de porco, 6% água, 93% gordura	-13	0,120	0,210	
	-4	0,120	0,210	
	5	0,120	0,210	
	14	0,120	0,210	
	23	0,120	0,210	
	32	0,120	0,210	
	41	0,120	0,210	
	50	0,120	0,210	
Gordura de ubre vaca 9% água, 89% gordura	-13	0,180	0,311	
	-4	0,180	0,311	
	5	0,180	0,311	
	14	0,180	0,311	
	23	0,180	0,311	
Sebo, 7% água	-4	0,147	0,254	Cherneeva (1956) Citado por Lentz (1961)

A	B	C	D	E
	14	0,131	0,227	
	23	0,122	0,211	
	32	0,118	0,204	
Gordura de porco, 8,1% água	-4	0,168	0,291	
	14	0,147	0,254	
	23	0,131	0,227	
	32	0,108	0,187	
Gordura de baleia, 4,3% água, 95% gor dura	-13	0,130	0,225	
	-4	0,130	0,225	
	5	0,126	0,208	
	14	0,120	0,208	
	23	0,120	0,208	
	32	0,110	0,194	
	41	0,110	0,194	
	50	0,110	0,194	

A	B	C	D	E
Sebo % água				
2,0	68	0,054	0,093	Lapshin(1951)
15,6	68	0,104	0,180	Citado por
29,5	68	0,200	0,346	Lentz (1961)
LEITE E PRODUTOS				
Leite não desnatado				
3,6% gordura	34,7	0,220	0,554	Riedel
	68,0	0,318	0,550	(1949) (a)
	122,0	0,339	0,567	
	176,0	0,355	0,614	
	70,0	0,320	0,554	Hall (1971)
Leite de vaca cru	97,1	0,302	0,523	Spells(1961)
	98,9	0,310	0,537	(a)
	97,4	0,310	0,537	
Leite condensado				
% água				
90	75,6	0,333	0,576	ASME (1959)
	105,7	0,347	0,601	(a)
	139,2	0,357	0,618	
	172,6	0,366	0,633	
80	79,9	0,308	0,533	
	104,9	0,323	0,559	
	139,0	0,338	0,585	
	173,5	0,347	0,601	

A	B	C	D	E
87	73,2	0,273	0,472	
	105,2	0,291	0,504	
	140,0	0,298	0,516	
	173,7	0,304	0,526	
50	78,8	0,187	0,324	
	103,8	0,197	0,341	
	139,1	0,206	0,356	
	173,1	0,210	0,363	
Leite evaporado r = 1(d), 2,5% gor dura	34,7	0,306	0,529	Riedel (1949)
	68,0	0,322	0,557	
	122,0	0,342	0,592	(a)
	176,0	0,358	0,619	
Leite evaporado r = 1,9	34,7	0,281	0,486	
	68,0	0,292	0,505	
	122,0	0,313	0,542	
	176,0	0,327	0,566	
Leite evaporado r = 2,54	34,7	0,264	0,457	
	68,0	0,273	0,472	
	122,0	0,295	0,511	
	176,0	0,308	0,533	

A	B	C	D	E
Leitelho, 0,35% gordura	34,7 68,0	0,312 0,329	0,540 0,569	
Soro, 0% gordura	34,7 68,0 122,0 176,0	0,313 0,328 0,349 0,370	0,542 0,567 0,604 0,640	
Leite não desnatado	68,0 176,0	0,320 0,350	0,554 0,606	Hall e H5 drick(1971)
Leite evaporado r = 1,9	68,0 176,0	0,280 0,320	0,485 0,554	
r = 2,54	68,0 176,0	0,260 0,300	0,450 0,519	
Soro	68,0 176,0	0,310 0,386	0,534 0,633	
ÓLEOS				
Óleo de fígado de bacalhau	93,1	0,097	0,167	Spells(1960)
Óleo de bacalhau	97,0	0,099	0,172	(a)
Óleo de limão	42,8	0,098	0,170	Sakladis(1952)
Óleo de noz moscada	39,2	0,090	0,156	(a)

A	B	C	D	E
Óleo de amendoim	39,2	0,097	0,168	
Óleo de gergelim	39,2	0,101	0,175	
Óleo de amendoa	39,2	0,103	0,177	
Óleo de oliva	84,0	0,097	0,168	Woolf (1954)
	120,0	0,096	0,166	(a)
	212,0	0,094	0,163	
	68,0	0,087	0,166	Kern (1954)
	212,0	0,086	0,164	(a)
OVOS				
Ovos brancos	91,4	0,324	0,561	Spells (1960)
	95,0	0,322	0,557	(a)
	98,0	0,322	0,557	
	100,8	0,320	0,554	
Gema de ovo	94,7	0,196	0,339	
	94,3	0,196	0,339	
	88,7	0,197	0,341	
	90,5	0,192	0,332	
Ovo cru congelado	14,0	0,660	0,969	
	20,0		0,969	
	20,8	0,560	0,969	
PEIXES				
Bacalhau	-20	0,724	1,250	Charm (1963 b)

A	B	C	D	E
Merluza	-4	1,060	1,334	Jason (1955)
	14	0,558	1,658	(a)
	34	0,314	0,543	
Salmão, Q 1	-13	0,728	1,250	Lentz (1961)
	-4	0,690	1,190	
	5	0,685	1,150	
	11	0,641	1,110	
	23	0,605	1,050	
	38	0,290	0,500	
Merluza liofilizada				
Pressão mmHg				
140 - 150		0,034	0,058	Lusk (1984)
70 - 90		0,011	0,019	
Filê de bacalhau	0,5	0,680	1,180	Speel(1958)
	6,9	0,680	1,180	(a)
Bacalhau curado Q 1	-13	0,098	0,168	Lentz (1961)
	-4	0,871	1,510	
	5	0,835	1,445	
	14	0,798	1,381	

A	B	C	D	E
	23	0,750	1,290	
	25	0,714	1,236	
	32	0,314	0,543	
VEGETAIS				
Brocole, densidade aparente 35 lb/ft ³	24,6	0,22	0,380	Smith (1952) (a)
	15,6	0,22	0,380	
Cenoure ralada den sidade aparente, 39 lb/ft ³	5,7	0,36	0,620	
	3,0	0,36	0,620	
Purê de cenoura den sidade aparente, 50 lb/ft ³	20,3	0,73	1,250	
	18,2	0,73	1,260	
Ervilha inglesa	0	0,01	1,060	
	80	0,61	1,060	
Purê de batata	4,8	0,63	1,090	
	13,1	0,63	1,090	
Feijão trituredo	12,4	0,53	0,920	
	5,5	0,53	0,920	
	53,8	0,22	0,380	
	41,5	0,22	0,380	

A	B	C	D	E
Abobrinha	32,0 59,0	0,29 0,29	0,500 0,500	Gane (1955) (a)
PRODUTOS DIVERSOS				
Cogumelo liofilizado				
Pressão (mmHg)				
760,0		0,0198	0,0343	Keppeler e
1,0		0,0113	0,0198	Cowart
0,3		0,0064	0,0111	(1972)
Purê de banana	60	0,3200	0,554	Charm (1963)
Produtos liofiliza- dos:				(b)
Gelatina	105	0,024	0,041	Saravacos e
Goma de celulose	105	0,036	0,062	Pilsworth
Albumem de ovo	105	0,024	0,042	(1965)
Pectina 10%	105	0,027	0,047	
Pectina 5%	105	0,023	0,039	
Pectina 5% com glu- cose 5%	105	0,020	0,049	
Amido de batata	105	0,024	0,049	

(a) - Citado por Woodams e Nowrey (1968)

(b) - Q 1 é fluxo de calor perpendicular a fibra

(c) - Q 11 é fluxo de calor paralelo a fibra

(b) - r = peso inicial de leite/peso depois da evaporação

IV. NOMENCLATURA

A	área da secção plana perpendicular ao fluxo de calor, m^2
A_1	área superficial interna, m^2
A_2	área superficial externa, m^2
C	constante da Equação de Harper (1962), mmHg
C_p	calor específico, J/Kg $^{\circ}$ K
f	declividade recíproca negativa, da curva de penetração de calor, min.
h	coeficiente de transferência de calor $J/m^2 \text{ sec } ^{\circ}$ K
k	condutividade térmica, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
k_c	condutividade térmica da fase contínua, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
k_d	condutividade térmica da fase dispersa, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
k_e	condutividade térmica efetiva, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
k_g	condutividade térmica do gás no sólido poroso, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
k_{go}	condutividade térmica do gás livre, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
k_s	condutividade térmica do sólido poroso, J/m $\text{sec } ^{\circ}$ K
L	comprimento ou distância, m
m_f	umidade final, Kg água/Kg de produto
m_i	umidade inicial, kg água/kg de produto
Q	fluxo de calor, Watt
R	fluxo total de vapor na sublimação, Kg/hr
R_1	raio interno, m
R_2	raio externo, m
s	calor de sublimação, j/Kg
T_1	temperatura interna, $^{\circ}$ K
T_2	temperatura externa, $^{\circ}$ K

T_i temperatura de interfase, °K
 T_s temperatura da região seca, °K
 V_c volume da fase contínua, m³
 V_d volume da fase dispersa, m³
 W perda de peso, Kg/hr.

LETRAS GREGAS

α difusividade térmica, m/sec
 θ_1 tempo inicial, sec
 θ_2 tempo final, sec.
 ϕ porosidade
 ρ densidade, Kg/m³
 ρ_s densidade da região seca Kg/m³
 μ_1 função matemática
 λ_1 função matemática

As unidades acima citadas correspondem ao Sistema Internacional de Unidades.

V. BIBLIOGRAFIA

- Ball, C.O. e Olson, F.C.W., 1957. "Sterilization in Food Technology". Mc Graw Hill Book, Company, Inc., New York, First Edition.
- Chandra, S., e Muir, W.R., 1971. Thermal conductivities of spring wheat at low temperatures. Transactions of the ASAE. 14, 644.
- Charm, S., 1963 a. A method for experimentally evaluating heat-transfer coefficients in freezers and thermal conductivity of frozen foods. Food Technol. 17, 1305.
- Charm, S., 1963 b. "The Fundamentals of food Engineering". The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut, First Edition.
- Eckert, E.R.G. e Drake, R.M., 1959. "Heat and Mass Transfer". Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York, Second Edition.
- Dickerson, Jr., R.W., 1965. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technol. 19, 880.
- Dickerson, Jr., e Read, Jr., R.B., 1968. Calculation and measurement of heat transfer in foods. Food Technol. 22, 1533.
- Hall, C.W., e Hedrick, T.I., 1971. "Drying of Milk and Milk Products". The AVI Publishing Company, Inc., Westport Connecticut, Second Edition.
- Hayakawa, K., 1971. Development of a procedure for determining the apparent thermal diffusivity of viscous liquid food by using cylindrical cell. Eleventh International Thermal Conductivity Conference, Albuquerque, New México, September 28 - October 1.

- Harper, J.C., 1962. Transport Properties of gases in porous media at reduced pressures with reference to freeze-drying. A.I.Ch.E. Journal, 8, 298.
- Harper, J.C., e El Sahrigi, A.F., 1964. Thermal conductivities of gas-filled porous solid. Ind. and Eng. Chem. Fund., 3, 318.
- Hill, J.E., Leitman, J.D. e Sunderland, E.J., 1967. Thermal conductivity of various meats. Food Technol. 21, 1143.
- Keppeler, R.A., e Cowart, D.G., 1972. Thermal properties of freeze-fried mushrooms. Journal of Food Science 37, 205.
- Jason, A.C., e Jawitt, R., 1969. "Physical Properties of Foods-tuffs in Relation to Engineering Design". Dechema Monographien, Band 63, Verlag Chemie GmbH, Weinheim of Bergstrasse.
- Lentz, C.P., 1964. Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gel and ice. Food Technol. 15, 243.
- Lusk, G., Karel, M., e Goldblith, S.A., 1964. Thermal conductivity of some freeze-dried fish. Food Technol. 18, 1625.
- Massey, W.M., e Sunderland, E.J., 1967. Measurement of thermal conductivity during freeze-drying of beef. Food Technol., 21, 408.
- Morley, M.J., 1966. Thermal conductivities of muscles, fats and bones. Food. Technol. 1, 303.
- Qasbi, M., Nix, G.H., Vachon, R.I., and Lowery, G.W., 1970. Thermal conductivity values for ground beef and chuck. Food Technol. 24, 493.
- Reidy, G.A. e Rippen, A.L., 1971. Methods for determining thermal conductivity in foods. Transactions of the ASAE, 14, 248.

Saravacos, G.D. e Pilsworth, Jr.M., 1965. Thermal conductivity of freeze-dried model food gels. Food Technol. 30, 774.

Silvetz, M., Elliot, F., 1963. "Coffee Processing Technology" Vol.1, The AVI Publication Company, Inc. Westport, Connecticut, First Edition.

Stolf, S.R., 1973, Medição da condutividade térmica dos alimentos. Boletim nº 29 do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, São Paulo.

Stuart, E.B., e Closset, G., 1971. Pore size effect in the freeze-drying process. Journal of Food Science, 36, 336.

Tait, R.W.F., e Hills, B.A., 1964. Methods for determining liquid thermal conductivities. Ind. Eng. Chem., 56, 29.

Triebes, T.A., e King, C.J., 1966. Factor influencing the rate of heat conduction in freeze-frying. Ind. and Eng. Chem. Process Desing and Development, 5, 430.

Walters, R.E., e May, K.N., 1963. Thermal Conductivity and density of chicken breast muscle and skin. Food Technol. 17, 809.

Woodams, E.E., e Nowery, J.E., 1966. Literature values of thermal conductivities of foods. Food Technol. 22, 494.

...00000...