

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Medidas de Condutividade Térmica de Frutos  
in natura**

(Trabalho de Conclusão de Curso)

Ricardo Pereira Bonini

Maringá, novembro de 2012.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Medidas de Condutividade Térmica de Frutos  
in natura**

(Trabalho de Conclusão de Curso)

Ricardo Pereira Bonini

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a  
Universidade Estadual de Maringá sob a ori\_  
entação do prof. **Dr. José Roberto Dias  
Pereira** para obtenção do título de Bacharel  
em Física.

Maringá, novembro de 2012.

*"Seja a mudança que você deseja ver no mundo."*

Mahatma Gandhi

# AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edgar e Regina Bonini por todo apoio e carinho que me deram, pelo exemplo de caráter, por uma boa educação e por tudo mais que me fez ser a pessoa que hoje sou.

Agradeço meu irmão Rodrigo Bonini por sempre me apoiar e me ensinar valores importantes e ser uma das pessoas mais presentes na minha vida, junto de meus pais são as pessoas mais importantes que tenho.

Ao professor Dr. José Roberto por ter me orientado durante esse trabalho.

Aos companheiros de curso que conheci durante a graduação.

Aos amigos que fiz ao longo dos anos.

E não posso esquecer dos amigos da ALATTE, Angel, Allan, Rodrigo Thomas, Tiago, Joshua, Thalisson, Karin, Ketlin, Franciel, Rafael, Pedro e Rodrigo Candido (Birigui).

## Resumo

Para descrever numericamente fenômenos térmicos, em materiais alimentícios, como frutas in natura, grãos e hortaliças muitas vezes se recorre a valores constantes de propriedade como a condutividade térmica, difusividade térmica e massa específica, tornando imprecisas as simulações de acondicionamentos destes materiais, em função da temperatura. A determinação de valores mais precisos para esse tipo de material tem grande importância para indústria de alimentos, como por exemplo, o aprimoramento e desenvolvimento de técnicas de armazenagem, processamento, transporte, etc., desses alimentos. Nesse trabalho temos como objetivo o estudo de um sistema de fonte de calor para a determinação da condutividade térmica de frutas “in natura”. O estudo de propriedades térmicas é de interesse das indústrias de alimentos, bebidas, medicamentos, cosméticos, químicos e petroquímicos.

Palavras-chave: Condutividade térmica, frutas “in natura”, indústria de alimentos.

---

# SUMÁRIO

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
Objetivos . . . . .	2
<b>1 Revisão Literária</b>	<b>3</b>
1.1 Condutividade Térmica . . . . .	3
1.2 Determinação da condutividade térmica em produtos alimentícios . . . . .	4
1.2.1 Método estacionário . . . . .	4
1.2.2 Método semi-estacionário . . . . .	6
1.2.3 Método Transiente . . . . .	8
<b>2 Metodologia e Materiais</b>	<b>10</b>
2.1 Metodologia . . . . .	10
2.1.1 Desenvolvimento teórico . . . . .	11
2.1.2 Método experimental . . . . .	13
2.2 Materiais . . . . .	14
2.2.1 Materiais utilizados para construção da sonda . . . . .	14
2.2.2 Equipamentos utilizados . . . . .	15
<b>3 Resultados e análises</b>	<b>16</b>
3.1 Dados experimentais . . . . .	16
3.2 Análise dos dados . . . . .	18
<b>Considerações finais</b>	<b>19</b>

---

# INTRODUÇÃO

Um dos maiores setores econômicos do Brasil é a agricultura, o valor da produção agrícola em 2010 alcançou R\$ 154,0 bilhões [1], cerca 4,2% do PIB anual de 2010. Um ramo muito importante da indústria agrária no Brasil é a fruticultura. Atualmente o Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo com uma produção de mais de 40 milhões de toneladas ao ano, 6% da produção mundial, e cresce 1,93% ao ano desde 1990 [2]. Segundo o IBGE em 2010 o valor total da produção foi de R\$ 20,6 bilhões, o que representa uma importância econômica muito grande.

Atualmente o estudo de propriedade física de alimentos em geral tem crescido muito, devido a importância para a indústria alimentícia em conhecer certas propriedades físicas, sobre tudo as propriedades térmicas dos alimentos. A fim de melhorar e aperfeiçoar o armazenamento de alimentos e o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados e mais econômicos é de fundamental importância conhecer conceitos e propriedades físicas de alimentos, tais como o calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica, massa específica e outros. A determinação de valores numéricos para propriedades térmicas geralmente é associadas com valores constantes, o que resulta em aproximações grosseiras. Mas por meio de estudos laboratoriais podem-se obter valores mais próximos dos reais que levam em conta fatores como: o teor de água da fruta que interfere nos valores da condutividade, difusividade térmica da fruta, o que pode ocasionar mudanças físicas e químicas na fruta quando ela sofre variações de temperatura, como, por exemplo, em processos de armazenamento, estocagem, transportes e muitos outros que ocorrem. Essas mudanças em suas propriedades físicas e químicas podem interferir em características da fruta como, coloração, paladar e odor, o que causa uma perda para o produtor e para a indústria alimentícia.

Em particular, para o transporte e armazenamento de frutas conhecer a condutividade térmica é essencial, por estar associada à velocidade de transferência de calor por meio

---

de condução térmica. Em materiais sólidos a energia térmica pode ser conduzida de duas maneiras: por movimento dos elétrons livres mais energéticos e pela vibração do retículo cristalino que forma o material. Um material com um alto valor da condutividade térmica, transporta calor mais rapidamente, Fazendo analogia com a eletricidade, mais especificamente com a resistência elétrica, a condutividade representa a dificuldade ou facilidade que o calor tem em se difundir no material. Como a condutividade térmica é uma propriedade da matéria, ou seja, cada material tem seu próprio valor, de modo análogo, cada fruta também terá seu próprio valor para a condutividade térmica, podendo variar conforme a umidade e outras características da fruta.

O método de sonda linear de aquecimento pode ser usado para determinação da condutividade térmica de maneira empírica sendo um método relativamente preciso, podendo inclusive ser automatizado. Esse método foi desenvolvido por volta de 1950 para o estudo da condutividade de materiais de construção, mas logo teve uma ampla aplicação para a determinação da condutividade térmica de alimentos, como utilizado por Dickerson [6], Drouzas e Saravascos [7]. O que torna o método citado vantajoso é o baixo custo da produção, a facilidade de compra e montagens de seus componentes, a rapidez e facilidade das medidas e relativa simplicidade na análise de seus dados.

A sonda linear de aquecimento consiste, de maneira simplificada, de um fio de resistência como fonte de calor que fornece uma taxa de energia constante, ou seja, a potência dissipada pelo fio é constante e termopar registra a variação na temperatura da amostra em um determinado tempo. Um computador registra cada temperatura em seu respectivo tempo e para determinar a condutividade térmica do material é preciso plotar gráficos de temperatura um função do tempo e analisar cada curva, podendo comparar os dados obtidos no estudo, com valores tabelados de estudos anteriores.

Pretendemos neste trabalho de conclusão de curso realizar a montagem de uma sonda linear de aquecimento, também pretendemos estudar a equação de difusão térmica sob condições iniciais e condições de contorno específicas do método em questão, e assim construir gráficos para a determinação da condutividade térmica de frutos "in natura" em função do tempo de amadurecimento da fruta e poder comparar com valores descritos na literatura.

## Objetivos

- Montar uma sonda de aquecimento linear.
- Realizar medições da condutividade térmicas de frutos in natura.
- Estudar a equação de difusão de uma fonte linear de calor



---

---

# CAPÍTULO 1

---

## REVISÃO LITERÁRIA

Quando um sistema constituído por dois ou mais corpos que estão inicialmente com temperaturas diferentes forem colocados em contato, ocorrerá uma transferência de energia. O processo em que a energia é transportada entre os corpos é chamado de transferência de calor e para a energia em transito da-se o nome de calor. O fluxo de calor não pode ser medido ou observado diretamente, mas seus efeitos podem ser notados e medidos.[5]

### 1.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade da matéria que indica a quantidade de calor que fluirá por unidade de tempo através de uma área sobre a influência de um gradiente de temperatura. Quem definiu a condutividade térmica foi o físico e matemático francês J. B. J. Fourier no que hoje é conhecido como lei de condução de Fourier, que unidimensionalmente, para simplificar, é escrita:

$$q = kA \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

sendo:

- $q$ , é a quantidade de calor por unidade de tempo;
- $k$ , condutividade térmica;
- $A$ , unidade de área;
- $\frac{dT}{dx}$ , o gradiente de temperatura (nesse caso unidimensional).

Como a condutividade é uma propriedade material podemos entender então que cada alimento terá a própria condutividade que difere dos demais alimentos, mas como estes são constituídos de varias substancias que pode ou não estarem no mesmo estado físico, como por exemplo, o coco que contem uma parte solida (polpa) e outra liquida, desta forma a transferência de calor por condução ocorre de varias formas. Não é fácil prever os efeitos que a temperatura irá exercer sobre a condutividade térmica utilizando somente um modelo teórico, levando em conta que a temperatura também pode causar variações em sua estrutura química e em outros fatores físicos. Outro problema surge quando consideramos outros fatores que afetam diretamente o fluxo de calor no alimento, como, a forma, a quantidade de poros, o tamanho, etc.[9][10]

O fator que possivelmente mais influencia a condutividade térmica em alimentos é o teor de água contida nele. Conhecer o teor de água que constitui o alimento é uma das propriedades mais importantes que precisamos conhecer quando queremos trabalhar com um sistema onde haverá troca de energia, exemplificando em processos como desidratação, armazenamento, secagem, reidratação, estimar o prazo de validade e muitos outro, é preciso conhecer exatamente o conteúdo de água do alimento. Como a condutividade térmica depende da quantidade de água presente na fruta, em processos onde o teor de água varia a condutividade térmica também irá varia, ou seja, em um processo de armazenamento onde o teor de água da fruta sofre alteração o condutividade térmica não será constante podendo depender de fatores como a umidade do ar por exemplo.

## 1.2 Determinação da condutividade térmica em produtos alimentícios

Para determinar a condutividade térmica em produtos alimentícios de maneira experimental desenvolveu-se enumeras técnicas, que por sua vez são classificadas em três grupos, o método estacionário, o método semi-estacionário e o método transiente, cada um dos três tem suas vantagens e desvantagens, a melhor escolha irá depender do tipo de amostra a ser estudada.

### 1.2.1 Método estacionário

Este método apresenta algumas vantagens em relação aos outros métodos devido a simplicidade do modelo matemático adotado e a alta precisão dos resultados obtidos. Mas alguns pontos apresentam relativas desvantagens como por exemplo o tempo necessário para o sistema atingir o estado estacionário que pode demorar varias horas, a demora para atingir o estado estacionário também gerá outro problema, como esse tempo pode ser de

horas, a amostra pode sofrer variação no seu teor de água. A amostra também precisa ter forma geométrica bem definida e no caso de materiais líquidos e pastosos pode haver a troca de calor por meio de convecção o que ocasionaria valores errôneos. A técnica foi utilizada por LENTZ (1961) para medir a condutividade térmica de alimentos congelados, o modelo experimental utilizado foi o método da placa quente protegida[15]. Esse mesmo modelo também foi escolhido por SARAVASCO; PILSWORTH (1965) para medir com bastante precisão a condutividade térmica em géis.

No arranjo experimental do método de placa quente protegida a amostra tem forma de uma placa plana, homogênea e isotrópica é colocada entre uma placa fria e uma placa quente de modo a formar uma espécie de "sanduíche", com as extremidades isoladas. O sistema fica disposto de modo que o fluxo de calor que atravessa a amostra é unidimensional.

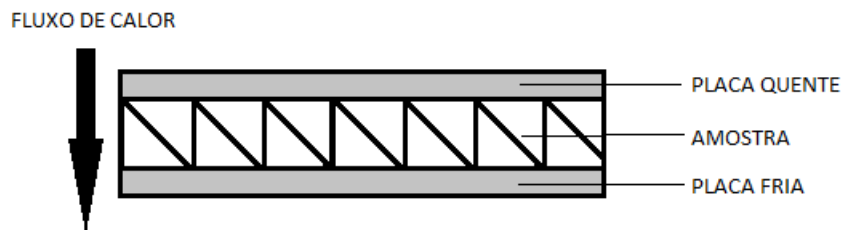


Figura 1.1: Diagrama do método de placa quente protegida.

Para esse método o modelo matemático é simples, utiliza-se a lei de Fourier unidimensional (eq. (1.1)). Como a amostra é um meio homogêneo e isotrópico podemos calcular o gradiente de temperatura ( $\frac{dT}{dx}$ ) utilizando  $\frac{\Delta T}{E}$ , sendo  $\Delta T = T_q - T_f$ ,  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre as placas,  $T_q$  é a temperatura na face quente,  $T_f$  temperatura na face fria e  $E$  é a espessura da amostra. Assim a equação (1.1) fica simplificada:

$$q = \frac{kA\Delta T}{E} = \frac{kA(T_q - T_f)}{E} \quad (1.2)$$

Para calcular o valor da condutividade térmica basta conhecer a quantidade de calor cedida pela fonte quente, as temperaturas das faces quente e fria e a espessura da amostra. O método da placa quente é padronizado pela American Society for Testing and Materials (ASTM), onde é recomendado o uso do método para amostras secas, assim podendo ser empregado em alimentos desidratados. O método é bastante utilizado para esse tipo de amostra devido sua simplicidade.

PARK et al. (1999) projetou outro método de medição em regime estacionário, que não utilizava o conceito de placas paralelas e um fluxo de calor unidimensional mas sim um cilindro com o fluxo de calor na direção radial. O equipamento era composto de um cilindro de PVC de 25 cm de diâmetro, 60 cm de altura, um fio resistor no centro do cilindro e seis

termopares dispostos radialmente no interior do cilindro . O equipamento foi utilizado para medir a condutividade térmica e a difusividade de grão, a equação utilizada para calcular a condutividade foi:

$$k = \frac{q}{2\pi r} \frac{\ln(R_e/R_i)}{(T_e - T_i)} \quad (1.3)$$

temos que:

- $R_e$  é o raio externo;
- $R_i$  é o raio interno;
- $T_e$  é a temperatura externa;
- $T_i$  é a temperatura interna;
- $r$  é a distancia entre o centro do cilindro e o termopar correspondente á temperatura  $T_e$ .

### 1.2.2 Método semi-estacionário

A medição da condutividade térmica por um regime semi-estacionário baseia-se na transferência de calor através da amostra, e o modelo matemático aplicado é a equação simplificada por FITCH (1935)[17]:

$$\frac{Ak(T - T_F)}{E} = m_{cu}Cp_{cu} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.4)$$

sendo:

- $T$  é a temperatura medida;
- $T_F$  é a temperatura da fonte;
- $m_{cu}$  é a massa do conector de cobre;
- $Cp_{cu}$  é o calor especifico do cobre.

A solução para a equação (2.4) com as condições iniciais  $t_0 = 0$  e  $T = T_0$  fica:

$$\ln \left( \frac{T_0 - T_F}{T - T_F} \right) = \frac{Akt}{Em_{cu}Cp_{cu}} \quad (1.5)$$

Através da inclinação da curva no gráfico de  $\ln \left( \frac{T_0 - T_F}{T - T_F} \right) \times t$  pode-se obter a condutividade térmica.

## 1 Revisão Literária

---

A técnica desenvolvida por FITCH (1935) é uma das mais utilizadas para a medição da condutividade térmica de condutores pobres. O equipamento experimental é basicamente uma fonte de calor em forma de vaso preenchida com um líquido à temperatura constante e um outro recipiente em forma de um conector de cobre com suas extremidades isoladas com exceção de uma face, a amostra fica entre as faces da fonte e do conector de cobre[17]. A figura 1.2 mostra o esquema experimental utilizado por FITCH (1935).

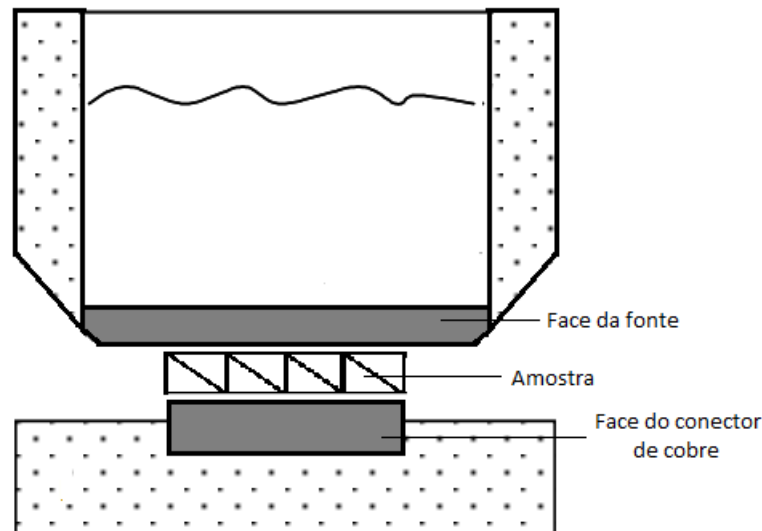


Figura 1.2: Diagrama do arranjo experimental de método de Fitch.

O mesmo modelo foi utilizado por BENNET et al. para medir a condutividade térmica de laranjas e toranjas. O grupo experimental constatou que para uma amostra com espessura de 0,635 cm, um tempo de 20 minutos de leitura de dados, a temperatura da face da fonte de  $54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  no conector de cobre resultariam num menor erro experimental.

ZURITZ et al. (1989) afirmaram que para o uso da técnica de Fitch a equação (1.5) só seria válida se algumas condições fossem respeitadas: a resistência de contato entre as faces desprezível, armazenamento de calor na amostra desprezível para que a transferência de calor na amostra seja em um regime semi-estacionário, temperatura da fonte de calor constante, conector de cobre e a amostra inicialmente em equilíbrio térmico e a amostra homogênea.

KULACKI; KENNEDY (1978) em um regime semi-estacionário aplicaram outra técnica para determinar propriedades térmicas de massa de biscoito. O equipamento era constituído de placas que ficavam parcialmente imersas em água a uma temperatura constante, este servia como reservatório de calor. A placa superior era também mantida em temperatura constante, mas menor que a temperatura do reservatório, esta placa servia com uma placa fria a placa inferior continha a amostra de massa de biscoito. Com os

dados obtidos desse estudo, o grupo concluiu que a condutividade térmica da massa de biscoito é parcialmente dependente da temperatura e obtiveram valores de  $k$  para a massa de biscoito seguindo as especificações da Associação Americana de Química de Cereais de  $0,405 \pm 0,02 \text{ W/mK}$  e para massa de biscoito tipo "hard-sweet" de  $0,390 \pm 0,04 \text{ W/mK}$ .

### 1.2.3 Método Transiente

Em uma transferência de calor em um regime transiente a temperatura varia tanto em função da posição como também em função do tempo, assim em um ponto fixo do espaço a temperatura irá mudar um função do tempo.

Dentre os métodos em regime transiente o que certamente mais se destaca é o método de sonda linear de aquecimento devido seu baixo custo para desenvolvimento, facilidade no transporte, rapidez na realização das medidas, etc.

O método de sonda linear de aquecimento baseia-se no aumento da temperatura, em função do tempo, de um fio metálico embutido em uma amostra. Injeta-se uma corrente elétrica constante no fio que se aquece por efeito joule. O fio aquecido irá trocar calor com o meio que o circunda geralmente a uma temperatura menor. O calor irá fluir do fio quente para o meio (amostra) de menor temperatura. O aumento da temperatura do fio irá depender da corrente que atravessa o fio e também das propriedades térmicas do meio.

O método de sonda linear foi desenvolvido primeiramente pelo prof. Dr. Van der Held da Universidade de Utrecht situada em Utrecht, Países baixos (vale lembra que vários ganhadores do premio Nobel estudaram lá). O objetivo era desenvolver um equipamento para medição da condutividade térmica de materiais de construção.

Apos modificações na primeira sonda de aquecimento desenvolveu-se na Universidade de Toronto, Canada, um equipamento denominado sonda de condutividade térmica. Esquemático na figura 1.3.

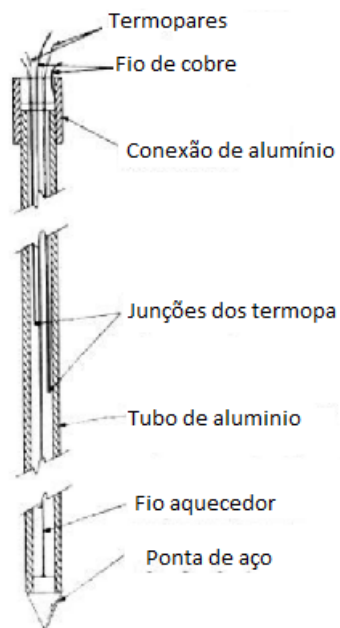


Figura 1.3: Esquema da sonda de condutividade térmica desenvolvida na Universidade de Toronto.

Era constituída por um tubo de alumínio, um fio resisto coaxial isolado era fixado no centro do tubo conectado na parte inferior do tubo e fechada com um conector pontiagudo. O fio resistor era a fonte de calor quando ligado em uma corrente elétrica, um conjunto de termopares próximo do centro do tubo ligados em série com outro conjunto de termopares externos realizavam as medições de temperatura.

SWEAT et al. (1973) utilizou o método de aquecimento linear para estudar as propriedades térmicas da carne de frango. A sonda utilizada tinha 0,8 mm de diâmetro e 38 mm de comprimento. A fonte de calor era um fio de constantan de 0,08 mm de diâmetro e isolado com teflon, o fio era fixado dentro da sonda e ela posta no centro da amostra, a cada 5 segundo fazia-se a leitura da temperatura durante um período de 2 minutos. O estudo concluiu que para a determinação de propriedade térmicas de carnes, sondas de 0,8 mm de diâmetro era o ideal.

---

---

## CAPÍTULO 2

---

### METODOLOGIA E MATERIAIS

#### 2.1 Metodologia

O método adotado nesse trabalho foi o da sonda linear de aquecimento de Blackwell, por ser um método simples, pode ser facilmente construído com baixo custo de seus componentes e também rapidez nas medições das amostras.

O método clássico da sonda linear (Blackwell) supõe uma fonte linear de calor imersa em um meio infinito, isotrópico e homogêneo com temperatura inicial  $T_0$ , cujas propriedades não variam com a temperatura. A sonda é formada por uma agulha hipodérmica, um fio resistivo isolado é fixado dentro da agulha, a sonda é posta no centro de um suporte de tecnil e fixada, um termopar também é fixado a uma certa distância do centro do suporte, a sonda é colocada no centro geométrico da amostra para realizar as medidas. A figura 2.1 mostra o esquema de montagem da sonda.

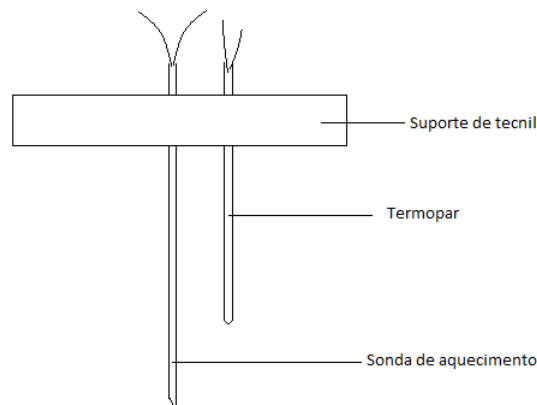


Figura 2.1: Diagrama da sonda linear de aquecimento.



O valor para a condutividade térmica é determinada através do coeficiente de inclinação da curva do gráfico da temperatura em função de  $t$ .

### 2.1.1 Desenvolvimento teórico

Podemos equacionar este método através da equação de difusão em coordenadas cilíndricas, para a difusividade térmica ( $\alpha$ ) independente da temperatura e da posição. A transferência de calor por condução no meio é dado por:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T(r, t) \quad (2.1)$$

ou

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

com

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

Adotando  $t$  para tempo,  $r$  para a distancia a partir da fonte de calor,  $k$  para a condutividade térmica,  $\rho$  para a densidade e  $C_p$  para o calor específico a pressão constante. Considerando o sistema isolado das vizinhanças e com geometria cilíndricas, podemos então resolver a equação (2.2) de acordo com as condições iniciais de  $t_0 = 0$  e  $r_0 = 0$  e as condições de contorno:

$$t_0 = 0 \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$r_0 = 0, t > 0 \rightarrow -2\pi r k \frac{dT}{dr} = Q = \text{cte} \quad (2.4)$$

$$r \rightarrow \infty, T \rightarrow 0, \quad \frac{dT}{dt} = 0; \quad (2.5)$$

Desta forma a solução para a equação (2.2) ficará:

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \int_u^\infty \frac{e^{-u'}}{u'} du' \quad (2.6)$$

para:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha t}$$

Fazendo uso da integral exponencial

## 2 Metodologia e Materiais

---

$$Ei(\zeta) = \int_{\zeta}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\gamma - \ln(\zeta) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \zeta^n}{n.n!}$$

De modo que podemos escrever:

$$Ei(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u'}}{u'} du' = -C - \ln(u) + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{18} + \dots + \frac{(-1)^n u^n}{n.n!} \quad (2.7)$$

Sendo que C é a constante de Euler,  $C=0,577215664902$ . Substituindo a equação (2.7) na equação (2.6)

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left( -C - \ln(u) + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{18} \right) \quad (2.8)$$

Se considerarmos  $u$  muito pequeno para tempos longos ( $t \gg u$ ), de modo que desprezaremos os termos de ordem superior, e a equação fica reduzida a seguinte expressão.

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[ -C - \ln \left( \frac{r^2}{4\alpha t} \right) \right] \quad (2.9)$$

Lembrando que;

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

A razão entre a condutividade térmica ( $k$ ) e o produto da densidade ( $\rho$ ) com a capacidade térmica ( $C_p$ ) define a difusividade térmica do material ( $\alpha$ ), que mede a relação entre a capacidade do material conduzir energia térmica e a capacidade do mesmo em armazenar essa energia, a difusividade mostra como o calor vai se difundir no material, quanto maior for a difusividade mais rapidamente o material vai responder as variações de temperatura do ambiente.

A difusividade térmica de alimentos como as frutas depende da umidade e temperatura dentre outras coisas, daí surge a importância de catalogar esses parâmetros físicos em diferentes condições de temperatura e nível de umidade da fruta.

Para a superfície da sonda onde  $r = a$  podemos reescrever a equação (2.9)

$$T(a, t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha t}{a^2} \right) - C \right] \quad (2.10)$$

De modo que  $a$  é a posição radial do fio aquecido, ou fonte de calor. Para determinado fluxo de calor, seguindo o procedimento de Hooper e Leppe (1950), pode-se avaliar a condutividade do material conhecendo os valores da temperatura em um ponto específico a partir da fonte linear de calor, nos tempos  $t_0$  e  $t$ . Ao invés de tomarmos a temperatura em um dado instante, toma-se a diferença de temperatura entre os dois instantes distintos  $t_1$  e  $t_2$ , desta maneira a equação (2.10) ficará reduzida e a constante C será eliminada. Assim

## 2 Metodologia e Materiais

---

podemos escreve-la da seguinte forma:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.11)$$

Sendo  $\Delta T$  é a variação da temperatura no ponto especificado ( $^{\circ}C$ ),  $t_1$  e  $t_2$  são os tempos iniciais e finais respectivamente. Mas para que a equação acima (equação 2.11) possa ser usada devemos idealizar as seguintes situações:

- i) Fio de comprimento infinito;
- ii) raio do fio infinitamente pequeno;
- iii) meio circundante infinito;
- iv) inexistência de resistência térmica de contato ou boa condução térmica entre o fio e o meio circundante.

Na pratica, as hipóteses i e ii são facilmente contornadas, tomando o comprimento do fio ( $L$ ) e o diâmetro ( $D$ ) de modo que  $L \gg D$ . Correções que consideram a oscilação inicial da fonte de calor e o aquecimento inicial do sistema, têm sido feitas por pesquisadores, utilizando um fator de correção ( $\tau_0$ ) que deve ser subtraído de cada tempo experimental. E finalmente chegamos a uma equação simplifica e de fácil compreensão.

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi k} \ln \left( \frac{t_2 - \tau_0}{t_1 - \tau_0} \right) \quad (2.12)$$

Temos que  $Q$  é a potencia da fonte de calor, calculado pela equação abaixo.

$$U = Ri$$
$$Q = Ui = Ri^2$$

Sendo  $U$  a tensão nos terminais da fonte de calor,  $R$  a resistência do fio e  $i$  é a corrente que atravessa o fio.

### 2.1.2 Método experimental

Como método experimental para medida de  $\Delta T$ , devemos ter uma sonda térmica constituída de uma agulha hipodérmica, tendo como elementos físicos em seu interior um fio resistivo e um termopar. O procedimento experimental das medidas é fazer a introdução da sonda no material e realizar as medidas através de um sistema de aquisição de dados, conectado a um microcomputador (pc). Os sinais dos termopares são amplificados e convertidos em temperaturas. O aquecimento do fio é mantido por uma fonte de corrente constante, monitorada pelo pc. A figura 2.2 representa a montagem experimental da sonda térmica.

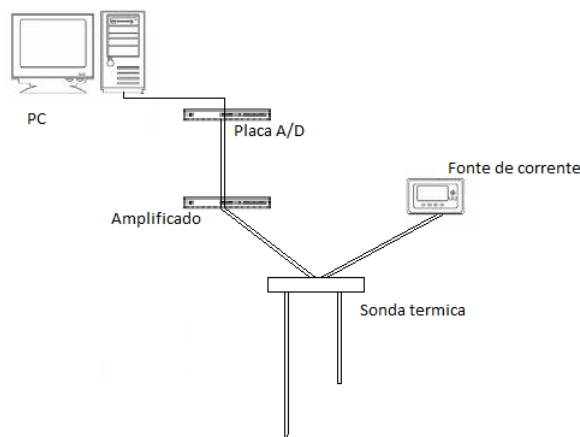


Figura 2.2: Diagrama do arranjo experimental do método de sonda linear de aquecimento.

## 2.2 Materiais

### 2.2.1 Materiais utilizados para construção da sonda

- Agulha hipodérmica: constitui o corpo da sonda de aquecimento onde abrigará o fio de resistência. Possui uma razão do comprimento pelo diâmetro  $\geq 25$ .
- Fio de resistência: junto com a agulha hipodérmica formam a sonda de aquecimento, pelo fio passará uma corrente elétrica por um período de tempo onde será convertida na forma de energia térmica, calor, como é explicado pela Lei de Joule. O fio de resistência  $33,68 \Omega/m$ ,  $0,34 m$  de comprimento e resistência total de  $11,45 \Omega$ .
- Termopares: fazem a medição das variações da temperatura das amostras.
- Resina epóxi: utilizada para isolar partes do fio de resistência e também para a fixação de componentes da sonda.
- Tecnil: tampa do béquer, suporte que abriga a sonda de aquecimento e os termopares.
- Béquer: recipiente onde deposita-se a amostra a ser analisada, lembrando que este precisa respeitar o item iii) da página 14.

### 2.2.2 Equipamentos utilizados

- Computador;
- Fonte de corrente contínua.
- Multímetro
- Software que faz a análise dos sinais enviados pelos termopares.
- Software para análise de dados e montagem de gráficos.

---

---

## CAPÍTULO 3

---

### RESULTADOS E ANALISES

A fruta escolhida para a realização das medidas foi a banana por ser um fruto muito consumido, barato e tem uma relevante importância no mercado, sendo a segunda fruta mais cultivada no Brasil e com um valor de produção de mais de R\$ 3,7 bi em 2010, 15,5% do valor total[1].

#### 3.1 Dados experimentais

A tabela abaixo mostra a configuração da fonte de corrente e da fonte de calor para o experimento.

Tabela 3.1: Valores da resistência, corrente e potencia.

Resistência ( $\Omega/m$ )	Resistência total ( $\Omega$ )	Corrente ( $A$ )	Potencia - Q ( $W/m$ )
33,68	11,45	0,37	4,6

Na figura 3.1 observa-se a cursa descrita pela eq. (2.12) com os valores obtidos através do método da sonda linear de aquecimento.

### 3 Resultados e análises

---

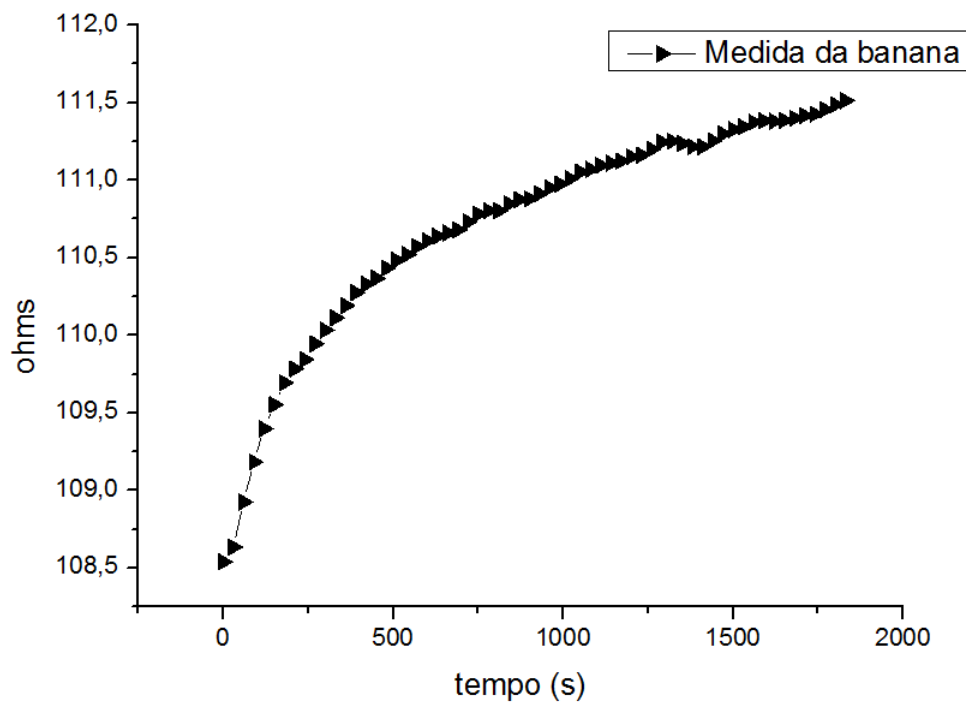


Figura 3.1: Gráfico de ohms em função do tempo

A resistência do termopar varia linearmente em função da temperatura, assim o gráfico pode representar a própria variação da resistência do termopar em função do tempo sem que as constantes se alterem.

Como a eq. (2.12) tem uma dependência em  $\ln(t)$  podemos então linearizar a curva mudando o eixo das abcissas para uma escala em logaritmos naturais.

A figura 3.2 representa a reta descrita pela variação da resistência do termopar agora em função do  $\ln(t)$  afim de calcular a inclinação da reta, está também representada na figura a seguir.

### 3 Resultados e análises

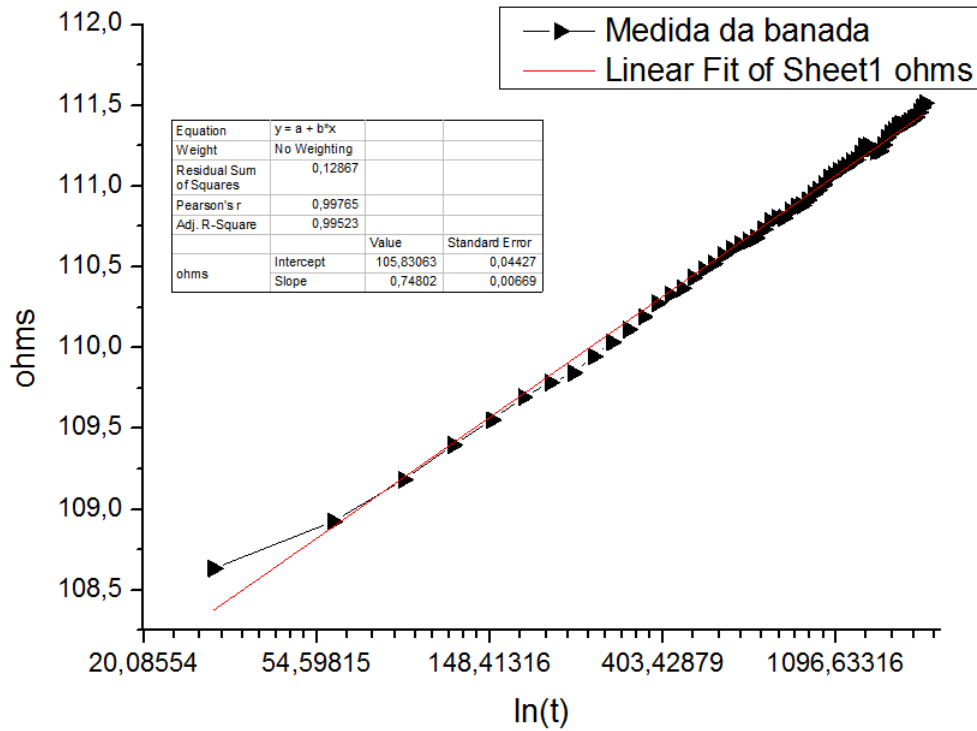


Figura 3.2: Gráfico de ohms em função de  $\ln(t)$

### 3.2 Análise dos dados

Consideremos que:

$$\beta = \frac{Q}{4\pi k}$$

Assim a equação (2.12) ficará:

$$\Delta T = \beta \ln \left( \frac{t_2 - \tau_0}{t_1 - \tau_0} \right)$$

Agora notasse que  $\beta$  é a inclinação da reta mostrada na figura 3.2, assumindo um valor de 0,74802. Com esse valor e com os dados mostrados na tabela 3.1 podemos calcular o valor para a condutividade térmica da banana:

$$\beta = 0,74802$$

$$k = \frac{Q}{4\pi\beta} = 0,489 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

A valor experimental encontrado para a condutividade térmica da banana foi de 0,489  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ .



---

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o termino desse trabalho podemos dizer que os objetivos propostos foram alcançados, para isso fizemos uma revisão literária sobre condutividade térmica e os métodos experimentais para a sua determinação, também fizemos uma revisão da equação de difusão em coordenadas cilíndricas. O objetivo principal do trabalho era a montagem de uma sonda linear de aquecimento e a determinação da condutividade térmica de frutos "in natura" e também foram cumpridos.

A condutividade térmica da banana encontrada foi  $k = 0,489 W/m^{\circ}C$ , comparando com o valor presente na literatura de  $k_{Te} = 0,481 W/m^{\circ}C$  [18], temos um erro de aproximadamente 2%, que é razoavelmente um bom resultado, desta forma a uso do método de sonda linear de aquecimento é adequado para alimentos sólidos e pastosos, com um baixo desvio nos resultados.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Produção Agrícola Municipal, Culturas Temporárias e Permanentes. IBGE, ISSN-0101-3963, vol. 37, 2010.
- [2] Fruticultura: Políticas, cenários, demandas e desafios. Ano 5, vol. 51, junho de 2011.
- [3] ABRAMOWITZ, M. and STEGUN, I. A. (Eds.). "Exponential Integral and Related Functions." Ch. 5 in Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th printing. New York: Dover, pp. 227-233, 1972.
- [4] KREITH, F. Principio da transmissão de calor, pg. 4, 1973.
- [5] KREITH, F.; BOHN S.M. Principio da transmissão de calor, pg. 1-9, 2001.
- [6] DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology. pag. 198-204, Maio de 1965.
- [7] DROUZAS, A.E. SARAVACOS, G. D. Effective thermal conductivity of granular starch materials. Journal of Food Science, Athens, v. 53, n. 6, pag. 1795-1799, 1988.
- [8] CARSLAW, H. S. JAEGER, J. C. Conduction of heat in solids, pg. 188, 194-196, 2000.
- [9] RAHMAN, S. Food properties handbook. New York, CRV Press, 1995.
- [10] SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. Engineering Properties of Foods. New York, Marcel Dekker, 1986. p. 49-87.
- [11] Ciênc. agrotec., vol. 31, n. 2, pag. 462-467, mar./abr., 2007.
- [12] Eng. Agric., Jaboticabal, vol. 24, n. 1, pag. 185-194, jan./abr., 2004.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [13] Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, vol. 3, n. 1, pag. 101-104, 2001.
- [14] Braz. J. Food Technol., vol. 6, n. 2, jun./dez., 2003.
- [15] RAO, M. A. RIZVI, S. S. H. DATTA, A. K., Engineering properties of foods. 3rd ed. Food science and technology. pag.171-229, 2005
- [16] HOOPER, F. C. LEPPER, F. R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers , v 56, pag.309-322, 1950.
- [17] RAHMAN, S. (1995). Food Properties Handbook. CRC Press, 1995.
- [18] INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P. Fundamentos de Transmissão de Calor e de Massa, Ed. Guanabara Koogan, RJ, 1998.