

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

**"COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS  
DA MASSA DE CACAU TORRADA  
CONVENCIONALMENTE E POR MICROONDAS"**

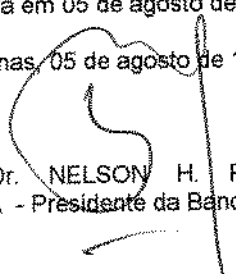
**Aluna Pesquisadora: María Victoria Gilabert Escrivá**  
**Professor Orientador: Dr. Nelson Horacio Pezoa García**

**PARECER**

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MARIA VICTORIA GILABERT ESCRIVÁ e aprovada pela Comissão Julgadora em 05 de agosto de 1997.

Campinas, 05 de agosto de 1997.

Prof. Dr. NELSON H. PEZOA  
GARCÍA - Presidente da Banca




Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Alimentos

Campinas, 5 de agosto de 1997



9908348

**BANCA EXAMINADORA**

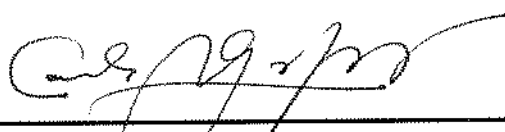


---

**Prof. Dr. N. Horacio Pezoa García**  
**(ORIENTADOR)**

---

**Prof. Dra. Marisa N. H. Jackix**  
**(MEMBRO)**



---

**Prof. Dr. Carlos A. Gasparetto**  
**(MEMBRO)**



---

**Prof. Dr. Antônio Marsaioli Jr.**  
**(MEMBRO)**

**Campinas, 5 de Agosto de 1997**

***Ao Rhodney, com amor  
A minha família com carinho  
e com saudades***

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. N. Horacio Pezoa García pela orientação e apoio dispensados durante todo o mestrado.

Aos Prof. Dra. Marisa N. H. Jackix, Prof. Dr. Carlos A. Gasparetto e Prof. Dr. Antônio Marsaioli Jr. pelas sugestões dadas na fase de correção deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

À INDECA pela doação do cacau usado nesta tese, e especialmente a Dna. Marília pelo apoio prestado na análise sensorial.

Ao Laboratório de Microondas do DEA, pela colaboração neste trabalho.

Ao Laboratório de Óleos e Gorduras, por toda a colaboração prestada e sobre tudo pela amizade oferecida.

Ao Laboratório de Frutas, Hortalças e Produtos Açucarados, representado pelos funcionários Aninha, Mara, Natalina e Valdeci, símbolo de atenção, dedicação e sobre tudo, amizade.

A Ana Lúcia, Luly, Toni, Marise, Sandra e Luís, pela amizade e pelo apoio.

A Henriette e Nély, pela amizade e sobretudo pela correção do português.

A todos os colegas de pós-graduação e a legião de estrangeiros da FEA, por me fazer sentir um pouco menos longe de casa.

Aos funcionários e professores do Departamento de Tecnologia de Alimentos.

Ao Professor Ramón pela preocupação e pelas longas conversas, ao Prof. Marcelo pela ajuda no computador nos momentos de desespero.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

***M. Victoria Gilabert Escrivá***

## SUMARIO

INDICE DE FIGURAS	I
INDICE DE TABELAS	III
NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. CACAU - GENERALIDADES	4
2.2. TORRAÇÃO DO CACAU	5
2.2.1. Torração convencional	7
2.2.2. Torração por microondas	13
2.3. AQUECIMENTO POR MICROONDAS	14
2.3.1. Introdução às microondas	14
2.3.2. Propriedades elétricas e físicas dos alimentos	18
2.3.3. Componentes de um forno de microondas	19
2.3.4. Aplicações na indústria de alimentos	20
2.3.5. Efeitos da energia das microondas sobre a microbiota e os componentes dos alimentos.	22
2.4. COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS FLUIDOS	24
2.4.1. Introdução	24
2.4.2. Comportamento reológico do chocolate	26
2.4.3. Fatores que afetam à viscosidade	29
2.4.4. Medida da viscosidade	31
3. MATERIAL E METODOS	34
3.1. MATERIAL	34
3.1.1. Amêndoas de cacau	34
3.1.2. Equipamento e aparelhos	34
3.1.3. Reagentes	35
3.2. MÉTODOS	35
3.2.1. Preparo da matéria-prima	35
3.2.2. Características físicas e químicas das amêndoas de cacau	36
3.2.3. Torração	37
3.2.4. Determinação da viscosidade	41
3.2.5. Análises realizadas nas amostras torradas	44
3.2.6. Análise sensorial	45

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	46
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	46
4.1.1. Análises químicas e físicas	46
4.1.2. Teste de corte	46
4.2. TORRAÇÃO CONVENCIONAL	47
4.2.1. Torração convencional	47
4.2.2. Torração por microondas	48
4.3. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS	53
4.4. MEDIDA DA VISCOSIDADE	54
4.4.1. Efeito do grau de torração	56
4.4.2. Efeito da umidade	57
4.4.3. Efeito do tipo de torração (tradicional ou por microondas)	57
4.4.4. Efeito do tipo de material torrado ("nibs" ou amêndoas)	58
4.4.5. Discussão	58
4.6. CURVA DE SÓLIDOS DA MANTEIGA DE CACAU	60
4.7. ANÁLISE SENSORIAL	62
<b>5. CONCLUSÕES</b>	64
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	66
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	67
<b>Apêndice A</b>	74
<b>Apêndice B</b>	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

	pg
<b>Figura 1.</b> Diagrama de fluxo do processamento das amêndoas de cacau (KEME, 1994).	9
<b>Figura 2.</b> Valores médios de temperatura dentro da cavidade do forno elétrico rotativo durante a torração dos nibs.	47
<b>Figura 3.</b> Valores médios de temperatura dentro da cavidade do forno elétrico rotativo durante a torração das amêndoas inteiras.	48
<b>Figura 4.</b> Curvas de calibração do alimentador para nibs e amêndoas.	49
<b>Figura 5.</b> Distribuição dos tempos de residência dos nibs e amêndoas no forno.	51
<b>Figura 6.</b> Reograma de Casson segundo a OICC (BECKETT, 1988).	54
<b>Figura 7.</b> Curva de sólidos totais na manteiga de cacau dos "nibs" torrados convencionalmente.	61
<b>Figura 8.</b> Curva de sólidos totais na manteiga de cacau dos "nibs" torrados por microondas.	61
<b>Figura 9.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de "nibs" em torrador elétrico por 34 min.	77
<b>Figura 10.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de "nibs" em torrador elétrico por 36 min.	78
<b>Figura 11.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de "nibs" em torrador elétrico por 38 min.	79
<b>Figura 12.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de "nibs" em forno de microondas com potência de 2600 W.	80
<b>Figura 13.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de "nibs" em forno de microondas com potência de 2800 W.	81
<b>Figura 14.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de "nibs" em forno de microondas com potência de 3000 W.	82

<b>Figura 15.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em torrador elétrico por 40 min.	83
<b>Figura 16.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em torrador elétrico por 42 min.	84
<b>Figura 17.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em torrador elétrico por 44 min.	85
<b>Figura 18.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em forno de microondas com potência de 2800 W.	86
<b>Figura 19.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em forno de microondas com potência de 3000 W.	87
<b>Figura 20.</b> Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em forno de microondas com potência de 3200 W.	88



## INDICE DE TABELAS

	pg
<b>Tabela 1.</b> Composição química do cacau (MINIFIE, 1970).	5
<b>Tabela 2.</b> Características das microondas mais usadas no mundo.	14
<b>Tabela 3.</b> Espectro das radiações eletromagnéticas.	16
<b>Tabela 4.</b> Composição química da amêndoa	46
<b>Tabela 5.</b> Constituição da amêndoa.	46
<b>Tabela 6.</b> Resultados da prova de corte do cacau usado na tese.	47
<b>Tabela 7.</b> Valores de calibração do alimentador do microondas	49
<b>Tabela 8.</b> Condições do processo por microondas	50
<b>Tabela 9.</b> Porcentagem de nibs marcados, determinando o tempo de residência médio da amostra no interior do microondas.	52
<b>Tabela 10.</b> Porcentagem de amêndoas marcadas, determinando o tempo de residência médio da amostra no interior do microondas.	52
<b>Tabela 11.</b> Densidade de potência de microondas aplicada aos "nibs" e às amêndoas e temperatura de saída do produto após 10 minutos de torração.	53
<b>Tabela 12 .</b> Valores de umidade, gordura, viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de "nibs" torrados convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.	55
<b>Tabela 13 .</b> Valores de umidade, gordura, viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ), do "líquor" obtido de amêndoas torradas convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.	55
<b>Tabela 14.</b> Parâmetros de Casson das quatro amostras analisadas sensorialmente.	59
<b>Tabela 15.</b> Viscosidade plástica em função da porcentagem de gordura (TANERI, 1976)	59

<b>Tabela 16.</b> Valores de porcentagem de sólidos totais na manteiga de cacau das amostras torradas em "nibs", por microondas e da forma convencional.	60
<b>Tabela 17.</b> Valores iniciais de umidade (%), viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de "nibs" torrados convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.	74
<b>Tabela 18.</b> Valores iniciais de umidade (%), viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de amêndoas torradas convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.	74
<b>Tabela 19.</b> Equações de regressão linear de Casson obtidas da medida da viscosidade de todas as amostras torradas em "nibs" tanto no microondas quanto no forno elétrico, (por triplicata).	75
<b>Tabela 20.</b> Equações de regressão linear de Casson obtidas da medida da viscosidade de todas as amostras torradas em amêndoas tanto no microondas quanto no forno elétrico, (por triplicata).	76

## **NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS**

**N2600.** ("Nibs" torrados com 2600 W de potência de microondas)

**N2800.** ("Nibs" torrados com 2800 W de potência de microondas)

**N3000.** ("Nibs" torrados com 3000 W de potência de microondas)

**A2800.** (Amêndoas torradas com 2800 W de potência de microondas)

**A3000.** (Amêndoas torradas com 3000 W de potência de microondas)

**A3200.** (Amêndoas torradas com 3200 W de potência de microondas)

**N34.** ("Nibs" torrados por 34 minutos em forno elétrico)

**N36.** ("Nibs" torrados por 36 minutos em forno elétrico)

**N38.** ("Nibs" torrados por 38 minutos em forno elétrico)

**A40.** (amêndoas torradas por 40 minutos no forno elétrico)

**A42.** (amêndoas torradas por 42 minutos no forno elétrico)

**A44.** (amêndoas torradas por 44 minutos no forno elétrico)

## RESUMO

O processo de torração é fundamental para a obtenção das características de qualidade do cacau. Quando torradas convencionalmente, as amêndoas de cacau produzem uma massa ("líquor") desuniforme, devido ao elevado gradiente de temperaturas entre o centro e a parte externa, deixando o interior cru ou a parte externa excessivamente torrada. Esta foi a causa do desenvolvimento da torração em fragmentos ("nibs") e das tentativas de torração do "líquor". Porém, estas técnicas amplamente difundidas precisam de várias etapas prévias, que encarecem o processo. Neste trabalho foi testada a torração por microondas, numa tentativa de diminuir o gradiente de temperaturas na amêndoa, aplicando um tratamento térmico mais uniforme. Este tipo de aquecimento difere do tradicional porque as ondas penetram no produto uniformemente, aquecendo-o não por convecção ou condução, como é o caso da torração convencional.

O objetivo deste estudo foi comparar estes dois tipos de torração de cacau: convencional, em forno elétrico rotativo de regime intermitente, e por microondas, em protótipo de forno rotativo contínuo por microondas (2450MHz). O cacau foi torrado tanto em amêndoas inteiras quanto fragmentadas em "nibs", para determinar a possibilidade de obter um produto uniforme através da torração em amêndoas inteiras usando a energia das microondas e os parâmetros mais adequados de tempo e potência requeridos.

As amêndoas originárias do estado do Pará, foram caracterizadas quantitativamente através da composição centesimal e porcentagem de componentes e qualitativamente através do teste de corte. A variável do tratamento por microondas foi a densidade de potência aplicada tanto às amêndoas inteiras (254,45 a 290,80 Wh/kg) quanto aos "nibs" (227,27 a 262,23 Wh/kg), com tempo de residência do produto no cilindro constante (10 min.). O tratamento convencional teve como variável o tempo de torração das amêndoas (40 a 44 min) e dos "nibs" (34 a 38 min), enquanto a temperatura da camisa do forno era mantida a 150°C. Após a torração, um total de 12 amostras foram moídas em moinho de rolos resfriados com a finalidade de obter o "líquor". Foram feitas análises de gordura, umidade e tamanho de partícula de cada amostra.

A comparação das amostras foi feita em termos de viscosidade, que é uma propriedade muito importante da massa de cacau, já que influencia tanto o seu uso final quanto a definição dimensional de equipamentos (tubulações, bombas). A viscosidade foi medida em reômetro Brookfield (mod. RV-DVIII), de cilindros concêntricos (adaptador de pequenas amostras), com temperatura controlada, mediante um programa baseado na bibliografia, com a finalidade de obter medidas e resultados os mais homogêneos possíveis.

A viscosidade plástica das amostras torradas em microondas foi, em geral, menor que a daquelas torradas em forno elétrico rotativo. A das amostras torradas em fragmentos ("nibs") também foi menor que a daquelas torradas em amêndoas inteiras quando torradas em forno elétrico. Quando o tratamento foi por microondas, a viscosidade das amostras obtidas de amêndoas torradas inteiras foi menor que a das amostras torradas em "nibs".

A análise sensorial realizada com três especialistas mostrou que o sabor das amostras torradas em microondas foi similar ao do "líquor" obtido da torração convencional, apresentando como vantagem a redução de tempo deste novo processo.

Os resultados obtidos, pioneiros nesta área, podem ser considerados positivos pois o fato de as amostras torradas em microondas serem menos viscosas pode favorecer o manuseio do "líquor" e representar uma redução na quantidade de manteiga de cacau a ser adicionada no processo de fabricação do chocolate, o que representa uma vantagem econômica. Também pode ser destacado o fato de que a torração de amêndoas em microondas (3200 kW ou 290,80 Wh/kg), apresentou um produto uniforme e de boas características sensoriais, sem precisar de nenhum tratamento prévio.

## ABSTRACT

The cocoa roasting process is of fundamental importance in producing the quality characteristics of cocoa. When conventionally roasted, cocoa beans produce a non-uniform cocoa-mass (liquor) due to the considerable differential in temperature between the surface and the core of the bean, leaving the latter raw or the former excessively roasted. To avoid this, a new roasting procedure was developed using either nibs (peeled and broken beans) or liquor (cocoa mass). However, these widely divulged techniques require preliminary stages which make the treatment more expensive. In this work, microwave roasting was tested, attempting to reduce the temperature gradient in the cocoa bean by using a more uniform heating treatment. Microwave heating differs from traditional methods because the waves penetrate the product uniformly, not heating either by conduction or by convection, as is the case in conventional roasting.

The objective of this study was to compare the microwave continuous roasting process (2450MHz) with the conventional batch method, evaluating the efficiency of the use of microwaves in the roasting of whole beans and nibs, and also determining the ideal time-energy combinations for the roasting of cocoa by microwaves.

Treated beans from the state of Pará were quantitatively analysed to determine the proximate composition of the raw material and also qualitatively analysed (cut test). The variable used in the microwave treatment was the power density applied to the whole beans (254,45 a 290,80 Wh/kg) and to the nibs (227,27 a 262,23 Wh/kg), with a constant residence time of 10 minutes. The process was undertaken in a prototype of a continuous rotary cylindrical microwave oven. The variable used in the conventional roasting process was the roasting time of the beans (40 to 44 min.) and the nibs (34 to 38 min). This process was carried out at a constant temperature of 150°C in a rotary electric oven.

After roasting, 12 samples were ground in a refrigerated cylinder mill to obtain the liquor. The fat content, moisture and particle size were determined in each sample.

The samples were compared with respect to viscosity, which is a very important property of the liquor, since it determines both its final use and the size definition of equipments like pipes and pumps. The viscosity was measured in a Brookfield rheometer (mod RV-DVIII) with two concentric cylinders (small sample adapter), and controlled temperature, using a program based on the literature aimed at obtaining the most homogenous results possible.

In general, the plastic viscosity of the microwaved samples was lower than that of the conventional roasted samples. Also the nibs showed lower viscosities than the whole beans when roasted in the electric oven. The viscosity of the samples roasted in the microwave oven was lower in the whole beans than in the nibs.

The product was sensorially evaluated by three experts in cocoa flavour, and it was shown that the flavour of the microwave roasted products was similar to that of the conventionally roasted products, with the advantage of a reduction in process time.

These results are pioneer in this area and can be considered positive because low viscosity would improve the handling of the liquor and result in a reduction in cocoa butter addition in chocolate production, improving the economy of the process. Roasting of whole beans by microwaves offered a uniform and good flavoured product (A3200), and no pretreatment was required.

## 1.- INTRODUÇÃO

As propriedades reológicas do chocolate e dos alimentos em geral, segundo RAO (1977), são determinadas para muitos fins, como: controle de qualidade, correlação com avaliação sensorial, definição da estrutura e aplicações em engenharia de processos.

A viscosidade do chocolate é uma propriedade importante do ponto de vista reológico, pois influencia na utilização deste produto e de seus derivados, quando empregados como cobertura, recheio, moldado ou para decoração. A viscosidade é sempre o ponto de partida no processo de seleção e desenho de equipamentos, quando trata-se de um produto fluido como é o caso da massa de cacau, objeto deste estudo. É de vital importância no desenho do transporte do fluido e do processo em geral, afetando as tubulações, bombas, moinhos, prensas. Afeta também os parâmetros de operação, como a temperatura, já que a viscosidade diminui ao aumentar temperatura, sendo importante encontrar o intervalo adequado para facilitar o manuseio da massa, sem prejuízo para o sabor característico do produto.

A massa de chocolate fluida é um sistema disperso, sendo a fase contínua principalmente manteiga de cacau, e a fase dispersa, partículas insolúveis de cacau e cristais de açúcar no chocolate escuro e, adicionalmente, proteínas, açúcar e minerais no chocolate ao leite (TSCHEUSCHNER & WÜNSCHE, 1979).

A massa de cacau é o componente mais importante do chocolate, tendo uma grande influência nas características reológicas, portanto, seu estudo deve ser considerado de grande relevância. A manteiga de cacau é um componente majoritário do cacau (52 a 56% em base seca) e do chocolate, influenciando muito na viscosidade e qualidade geral de todos os produtos derivados do cacau. Os parâmetros da massa que mais influenciam a viscosidade do chocolate são principalmente a umidade, a distribuição do tamanho de partícula e o conteúdo de gordura.



Outra característica que ajuda a definir a qualidade do chocolate é o sabor final do produto. O sabor do chocolate não existe naturalmente nos grãos de cacau, sendo ele o resultado de uma série de reações, que ocorrem desde o tratamento pós-colheita do fruto (fermentação e secagem) até durante o processo de fabricação do chocolate.

A qualidade final do produto em relação ao sabor é influenciada por todas as etapas de fabricação. No processamento, a torração é uma das etapas mais importantes no desenvolvimento do sabor, uma vez que reações importantes dos compostos aromáticos ocorrem neste processo. As condições de torração, segundo PEZOA (1989), dependem de vários fatores como a origem, o tipo da amêndoa, o período de colheita, os tratamentos anteriores à torração, umidade, o tamanho das amêndoas e “nibs” e as características do sabor desejado. É por isso que STAUFFER (1994), reforça a afirmação de PEZOA (1989), destacando que o controle da torração ainda é feito de maneira subjetiva, existindo desta forma diferenças consideráveis de qualidade entre os produtos.

O processo de torração é fundamental na obtenção das características de qualidade do chocolate pois, durante esta etapa de aquecimento, ocorrem algumas mudanças, tais como a diminuição dos ácidos voláteis indesejáveis (como o acético), a inativação das enzimas que podem degradar a manteiga de cacau, o desenvolvimento do aroma e da cor típicos do chocolate e a perda de água.

A torração do cacau, quando feita da forma tradicional em amêndoas, não oferece um produto uniforme, pois, segundo estudos de MOHR (1978), a diferença de temperatura entre o centro e a superfície da amêndoa pode chegar a 12°C. A torração nos “nibs” pode diminuir esta diferença de temperatura, pois a transferência de calor é feita através de condução e convecção, e neste caso, a partícula é menor. A torração da massa de cacau finamente moída poderia conseguir um produto muito uniforme, mas o processo ainda está sendo estudado.

Devido ao interesse pelo desenvolvimento de novos sistemas de processamento da massa de cacau a fim de se obter produtos uniformes, será estudada a torração do cacau por microondas. A utilização de microondas poderia solucionar alguns dos problemas enfrentados no processo de aquecimento convencional, pois este é feito por condução de energia da superfície do material ao seu interior. As microondas possuem uma habilidade de penetração muito alta e geram calor através da massa de materiais eletricamente não condutores. Desta forma o gradiente de temperatura no material é reduzido, e o aquecimento é mais uniforme. A torração com microondas pode ocasionar mudanças químicas e físicas na massa de cacau. É importante estudá-las porque mudanças na viscosidade podem refletir no uso de menor quantidade de manteiga de cacau e, portanto, em diferenças favoráveis ou desfavoráveis no custo do produto final.

O interesse do estudo está em saber se o produto obtido por estes métodos teria as mesmas características físicas e químicas que o obtido pelo processamento convencional.

O presente trabalho tem como objetivo geral comparar a torração do cacau por microondas com a torração tradicional através das propriedades reológicas, a fim de determinar possíveis mudanças físicas importantes, que afetariam o processamento do chocolate

E como objetivos específicos:

- Contribuir na escolha dos parâmetros a utilizar no processo de torração por microondas, visando a diminuição de viscosidade na massa de cacau e o desenvolvimento melhor do potencial aromático do cacau.
- Estudar a uniformidade da torração por microondas em amêndoas inteiras. Esta alternativa eliminaria uma etapa importante do pré-processamento do cacau, a micronização, a qual aumenta o custo do processo quando as amêndoas fragmentadas ou “nibs” são torradas de forma convencional.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CACAU - GENERALIDADES

O cacau (*Theobroma cacao*, L.) é uma árvore da família *Sterculiaceae* cujos frutos são de cores diversas, dependendo da variedade (amarelo, vermelho ou roxo quando maduros), contendo no seu interior de 35 a 40 sementes envolvidas por uma polpa mucilaginosa, que serão, após fermentação e secagem, usadas para a fabricação da massa de cacau.

A produção varia principalmente em função da variedade, do clima e solo, sendo que nas regiões tropicais, com duas estações bem diferenciadas, a colheita é bianual. Existem três variedades principais de cacau: Forastero, Criollo e Trinitario. A variedade mais cultivada no mundo é a Forastero (representando aproximadamente 70% da produção mundial).

No início do pré-processamento os frutos do cacau são partidos, e as sementes, junto com a polpa, são fermentadas e posteriormente secas, sendo comercializadas desta forma (MINIFIE, 1970).

A composição química da amêndoa de cacau, apresentada na **Tabela 1**, depende de muitos fatores, principalmente da variedade, da origem, das práticas culturais e do grau de maturação.

As etapas que mais influenciam a qualidade do cacau são as do pré-processamento, começando com a colheita, tempo de espera até o corte dos frutos, fermentação e secagem. A presença de materiais estranhos e o possível ataque por fungos durante o transporte e armazenamento são fatores de qualidade muito importantes (STAUFFER, 1994).

(1992) consideram que a otimização das condições da torração significa desenvolver ao máximo o potencial aromático das amêndoas.

A torração do cacau não é um simples processo de desidratação, senão um tratamento térmico bem definido, que deve acontecer sob condições de tempo-temperatura e umidade severamente controladas e otimizadas para o desenvolvimento das características de sabor requeridas ao nível desejado (MINSON, 1992).

A torração do cacau, sob aquecimento controlado a elevadas temperaturas, é a etapa que incrementa a interação complexa entre os precursores de sabor e o sabor do chocolate resultante. Antes da torração, as amêndoas podem apresentar um sabor adstringente, ácido, mofado, de avelã, e inclusive de chocolate. Após a torração as amêndoas possuem o sabor intenso do cacau, embora continuem sendo de gosto agressivo. É por isso que a torração é uma das etapas mais importantes do processamento do cacau (MINSON, 1992).

A torração é necessária para o desenvolvimento do sabor e da cor do chocolate e contribue na redução da umidade e na separação das cascas das amêndoas. Com esta finalidade, as amêndoas são aquecidas em ambiente a 110-220°C, dependendo do tipo de cacau e do tipo de torrador. Uma das reações mais importantes ocorridas nesta etapa é a reação de Maillard, também chamada de escurecimento não enzimático. Porém, o cacau é uma mistura de muitas substâncias diferentes de açúcares ou aminoácidos; isto implica que estas outras substâncias podem interferir na reação de Maillard, modificando o produto final. Portanto, é virtualmente impossível identificar todas as reações ocorridas para se obter o sabor do chocolate (HOSKIN & DIMICK, 1988).

Durante a etapa de torração as enzimas são inativadas, a estrutura é modificada, favorecendo a moagem e o refino, e alguns voláteis são eliminados, entre eles, alguns indesejáveis como o acético, propiônico, butírico e outros.

### 2.2.1.- Torração convencional

A torração pode ser dividida em quatro etapas. A inicial consiste na evaporação da água superficial, sempre com a temperatura do ar controlada e não muito elevada, assim como a sua velocidade e umidade relativa. Durante a segunda fase, a superfície não está mais saturada e a quantidade de água transportada por capilaridade desde o interior da amêndoa não é suficiente para substituir a umidade evaporada da superfície; em consequência, a velocidade de secagem diminui. Durante a terceira fase, a secagem avança dentro do produto, a resistência à difusão aumenta e a velocidade de secagem cada vez é menor. Na quarta fase, a higroscopicidade do produto aumenta enquanto a velocidade de secagem é praticamente nula.

Se a temperatura do torrador é muito alta, a parte externa da amêndoa se tornará dura formando uma crosta que dificultará o transporte de água através dos capilares até a superfície, a amêndoa será mal torrada e os precursores do sabor do centro do cacau não reagirão suficientemente. Um incremento gradual da temperatura favorecerá a uniformidade e eficiência do tratamento.

A temperatura do ar encontra-se, após uma fase de aquecimento prévio, entre 110 e 175°C. Cada fabricante tem um critério próprio (99-200°C), mas como regra geral, o cacau que vai ser usado para fabricação de pó de cacau é torrado a temperaturas mais elevadas do que aquele próprio para chocolate (MARTIN, 1987).

#### 2.2.1.1.- Tipos de torração

KEME (1994) apresenta um diagrama de fluxo do processamento das amêndoas do cacau, onde aparecem as três formas de torração existentes: na amêndoa, nos "nibs" e no "líquor" (**Figura 1**). Cada uma delas tem vantagens e desvantagens e, como consequência das diferentes técnicas e parâmetros de processamento, o produto obtido terá características também diferentes de sabor, cor, viscosidade, etc.

## TORRAÇÃO DAS AMÊNDOAS INTEIRAS

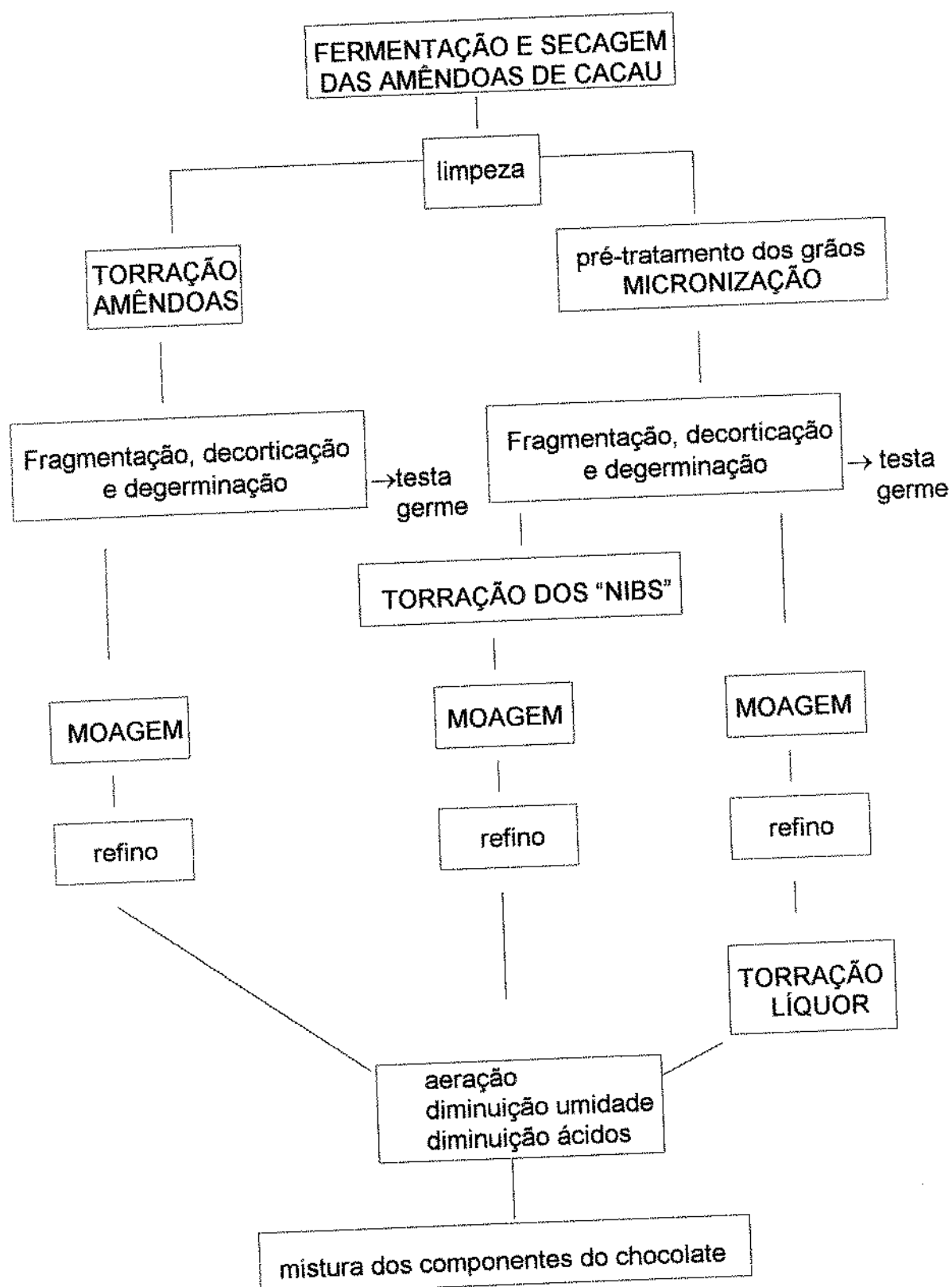
As desvantagens associadas à torração de amêndoas inteiras já foram muito revisadas: alto consumo de energia; má condução do calor através do cotilêdone, considerando ainda que a casca atua como isolante; migração da manteiga de cacau para a casca nos tratamentos térmicos mais severos; não uniformidade do tratamento devido a diferença de tamanho e pouca remoção de voláteis indesejáveis, fundamentalmente.

É importante que na torração de amêndoas inteiras o produto apresente uma temperatura uniforme. Uma diferença de 5°C da temperatura ideal de processamento, produzirá alterações importantes em relação ao sabor, sendo que o aumento da temperatura provocará perdas de manteiga de cacau, pois esta acaba migrando para a testa, a qual será posteriormente removida (BAUERMEISTER, 1981). Segundo estudos de MOHR (1978), a diferença de temperatura entre o centro e a superfície da amêndoa durante a torração convencional pode chegar a 12°C.

CARLIN et alii (1986) relatam que a manteiga de cacau obtida de grãos torrados tem um forte sabor e aroma de cacau, sendo que, se os grãos são submetidos somente a um tratamento com vapor, a manteiga não apresenta sabor e aroma característicos.

## TORRAÇÃO DOS "NIBS"

A maioria destes problemas próprios da torração das amêndoas poderiam ser evitados ou reduzidos realizando-se a torração nos "nibs", mas neste caso precisa ser feito o pré-tratamento térmico para facilitar a remoção das cascas que são eliminadas. Neste caso o tamanho é mais uniforme, portanto a transferência de calor é muito mais eficiente. O produto é mais homogêneo, e a perda de gordura por migração é menor (HUFFMAN, 1992). THORZ & SCHMITT (citados por MINSON, 1992) relatam também que a remoção de voláteis indesejáveis melhora com a remoção da casca.



**Figura 1.** Diagrama de fluxo do processamento das amêndoas de cacau.

Fonte: KEME (1994)

### Tratamentos prévios à torração dos "nibs"

Para eliminar a testa (casca) das amêndoas antes da torração existem alguns tratamentos que tornam a testa mais quebradiça, o que favorece sua remoção. Estes tratamentos podem ser baseados no uso de infravermelho (micronização e Indru), de ar quente ou de vapor saturado.

A micronização é um processo que envolve um aquecimento direto por infravermelho sobre um leito fluido de amêndoas. Demora entre um e dois minutos. O vapor criado no interior da amêndoa ajuda a separar as cascas já secas, do cotilédone, por pressão. Este resultado é conseguido sem muita perda de umidade por parte da amêndoa (MINSON, 1992).

O processo Indru submete as amêndoas ao calor de infravermelho durante o tempo em que elas passam através de um tambor rotatório. O movimento favorece a eliminação de partículas estranhas aderidas à parte externa do grão.

O ar quente é suficiente para separar a casca do cotilédone. Existem vários equipamentos que realizam esta operação, durante um curto período de tempo. Pode ser adicionado no último estágio um pouco de umidade para favorecer o processo.

O tratamento com vapor saturado resulta eficaz para conseguir a eliminação da casca, assim como para reduzir a contaminação microbiana. As amêndoas são saturadas com vapor em leito fluidizado e posteriormente são aquecidas a 180-200°C por 2-4 minutos (MINSON, 1992).

### *TORRAÇÃO DO "LÍQUOR"*

Muitos autores (BECKETT, 1988; KLEINERT, 1988; BERTINI, 1989; MINSON, 1992) relatam que a melhor forma de fazer a torração do cacau é na forma de "líquor", devido ao fato de que o resultado é um produto mais uniforme, e os voláteis são removidos com maior facilidade. Como maior inconveniente da torração do "líquor",



destacaria-se o manuseio de um produto extremamente viscoso como é o cacau cru finamente moído, que deve ser aquecido para poder fluir, devido ao alto teor de umidade.

As últimas tendências apontam para a torração do "líquor" cru, o qual, em teoria, favorece a uniformidade do tratamento, já que a umidade e os precursores do sabor estão distribuídos uniformemente. A transferência de calor é otimizada e a reação pode ser melhor controlada. Outra vantagem seria a maior facilidade de eliminação dos voláteis indesejáveis criados durante a fermentação e o armazenamento (BERTINI, 1989; MINSON, 1992).

#### **2.2.1.2.- Tipos de torradores**

Podem ser classificados fundamentalmente em dois tipos:

##### **CONTÍNUOS**

Os processos contínuos mais conhecidos são baseados em aquecimento por ar quente, que entra em contato com o produto a elevada temperatura. Este fato é contrário as sugestões citadas anteriormente por MARTIN (1987) de elevação da temperatura de forma gradual. Os torradores contínuos são usados, mas oferecem um produto desuniforme.

A maioria dos torradores modernos tem uma configuração vertical, em cascata, colunas, etc., onde o cacau é aquecido por ar quente na direção tangencial à queda das amêndoas. A temperatura e fluxo do ar são controlados mecanicamente. O produto cai numa bandeja vibratória transportadora, onde é feita a mistura das amêndoas (MARTIN, 1987).

Alguns sistemas citados por MINSON (1992) são: o torrador tipo Buhler onde o cacau passa por uma tubulação de pequeno diâmetro, e o ar quente é forçado transversalmente; o torrador tipo Lehmann, onde os "nibs" ou amêndoas atravessam, a intervalos regulares plataformas verticais aquecidas, fornecendo um produto final bastante uniforme; o sistema Petzholdt que torra o "líquor", sendo submetido

simultaneamente a uma corrente de ar quente e a uma injeção de vapor. O problema fundamental encontra-se na dificuldade de controle dos parâmetros de torração. A massa de cacau pode ser torrada em sistema contínuo, alimentando o torrador com uma fina camada de "líquor", que desce pela parede aquecida por um tempo aproximado de 55-100 s.

### *BATELADA*

Os torradores de cacau em batelada são tambores, dentro dos quais as amêndoas são torradas direta ou indiretamente (fogo, ar quente). O uso de ar quente insuflado através do material reduz o risco de queima ou supertorrção. Este tipo de torradores descontínuos ganharam a confiança da indústria devido a sua elevada reprodutibilidade e pelo melhor controle dos parâmetros de operação (MARTIN, 1987). O Barth é um sistema descontínuo, e trata-se de um tambor com aquecimento externo por ar quente, mantendo dentro do tambor uma atmosfera úmida que favorece a secagem e o controle microbiológico (MINSON, 1992). A massa de cacau pode ser torrada em batelada em um sistema denominado PDAT, que consiste de um grande tanque de reação, dentro do qual se produz vácuo e se injeta gás inerte, que favorecem a remoção dos voláteis.

### *TORRADOR MISTO*

Existe atualmente um torrador que combina ambos os processos. Trata-se de um tambor rotatório dividido em seis compartimentos, com umidade e temperatura controlada em cada um deles. O produto vai passando de um compartimento a outro, e a torração ocorre por transmissão de calor conveccional e por injeção de ar quente dentro da massa de amêndoas. Pode ser adicionado, ainda, vapor no segundo e terceiro estágio para promover a esterilização e a distribuição uniforme de calor. É mais versátil do que os torradores contínuos ou por batelada (MARTIN, 1987).

### 2.2.2.- Torração por microondas

As microondas podem ser vantajosas quando aplicadas aos processos de torração, em virtude de algumas características específicas, tais como a sua instantânea penetração no produto tratado, com rápida conversão da energia em calor, reduzindo-se os tempos de tratamento. A absorção seletiva de energia pelas zonas mais úmidas oferece um produto final mais uniforme (COPSON, 1975 in MARSAIOLI, 1991).

A torração de cacau por microondas está sendo estudada, pois poderia resolver alguns dos problemas enfrentados no processo de aquecimento convencional, como a falta de uniformidade do cacau torrado em amêndoas inteiras. A única referência bibliográfica encontrada data de 1978, quando FAILLON et alii, desenvolveram um protótipo de forno de microondas e estudaram alguns parâmetros de torração de cacau. O equipamento foi proposto para ser aplicado a nível industrial, mas a decisão final estava em função da rentabilidade econômica; naquela época resultava caro o investimento em um equipamento deste tipo, devido à baixa produção de componentes para microondas. Na atualidade, seria de interesse retomar este projeto de torração por microondas, já que a produção de fornos aumentou consideravelmente e o preço dos componentes diminuiu.

O aquecimento convencional é feito por condução de energia da superfície do material para o seu interior, resultando em um processo muito lento se a energia tiver que penetrar a profundidades consideráveis. Se a temperatura for aumentada para acelerar o processo, o exterior do cacau pode ficar excessivamente seco, dificultando a saída de água do interior da amêndoa e comprometendo sua qualidade final. Para conseguir uma torração mais uniforme pelo método tradicional, deve-se fragmentar as amêndoas em partículas menores ou "nibs", previamente à torração, sendo necessária a chamada micronização, etapa que facilita a remoção da testa mediante aplicação rápida de calor.

O uso das microondas na etapa de torração do cacau visa principalmente garantir maior uniformidade da distribuição de energia no processo e, possivelmente, diminuir o tempo total desta operação. A absorção seletiva da energia pelas zonas mais úmidas se traduz em aquecimento e umidade final mais uniforme, portanto, a torração das amêndoas inteiras seria viável e satisfatória e o processo resultaria mais econômico, não precisando de micronização.

### **2.3. AQUECIMENTO POR MICROONDAS.**

#### **2.3.1.- Introdução às microondas**

A existência das ondas eletromagnéticas foi hipotetizada matematicamente por Maxwell e verificada experimentalmente por HERTZ em 1885. As microondas são caracterizadas como um tipo de onda eletromagnética que ocupa uma posição no espectro situada entre 300 MHz e 300 GHz. As microondas são uma forma de radiação electromagnética que possui propriedades similares às da luz visível, mas distinguem-se daquela em que o comprimento de onda é aproximadamente  $10^5$  vezes maior. Esta diferença exige técnicas completamente diferentes para a geração, transporte, detecção e uso dos campos de microondas em relação às técnicas de óptica (MARSAIOLI, 1991).

Atualmente as microondas tem sido objeto de muitos estudos visando um grande campo de aplicações. Devido à grande quantidade de possíveis usos e do risco de interferências nas comunicações, foi estipulada uma convenção internacional que define a frequência de uso industrial, médico e científico (NIOLA, 1990a). A frequência de 915 MHz ( $\lambda = 32,8$  cm) é a mais comum na América. A maioria dos fornos de microondas domésticos opera a 2450 MHz. Estas características são apresentadas na **Tabela 2**.

**Tabela 2 . Características das microondas mais usadas no mundo.**

<b>Frequência (MHz)</b>	915	2450	5480	24125
<b>Comprimento de onda (cm)</b>	32,8	12,2	5,2	1,24

A radiação eletromagnética emitida pelas microondas ocupa uma pequena faixa de frequências dentro do espectro eletromagnético entre o infravermelho e as ondas de rádio (300 MHz e 300 GHz), correspondendo à faixa de comprimentos de onda entre 1m e 1mm (**Tabela 3**), cujas frequências específicas encontram-se a 915 ou 2450 MHz. São geradas através de um "magnetron", que é um tubo oscilador alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter a energia elétrica industrial a baixas frequências (60 Hz), em energia eletromagnética de microondas (915 ou 2450 MHz), criando um campo eletromagnético com centros de cargas positivas e negativas, que mudam de direção bilhões de vezes por segundo (NUNES et alii, 1996). O campo eletromagnético se propaga na forma de onda eletromagnética no interior de um guia de onda metálico, até ser injetada no aplicador, onde encontra-se o produto a ser aquecido. A penetração de calor em um campo de microondas é praticamente instantânea, umas 10 ou 20 vezes mais rápida que convencionalmente (CUNHA, 1996).

Quando as microondas penetram no produto, interagem com os dipolos elétricos das moléculas de água e, por forças de atração e repulsão entre regiões carregadas, promovem a sua rotação no campo elétrico, resultando no rompimento das pontes de hidrogênio das moléculas vizinhas de água, gerando aquecimento por fricção molecular, sendo o calor transmitido ao longo do alimento por condução. Os íons dos sais dissolvidos nos alimentos geram aquecimento adicional pela interação com o campo elétrico, por migração através das regiões opostamente carregadas do campo, promovendo também o rompimento de pontes de hidrogênio (NUNES et alii, 1996).

O aquecimento dos produtos por microondas é do tipo dielétrico, produzindo calor em um corpo não condutor, devido a efeitos de polarização a frequências entre 300 MHz e 300 GHz. As microondas possuem uma capacidade de penetração muito alta e geram calor instantaneamente através de toda a massa de materiais eletricamente não condutores, produzindo aquecimento do material com gradientes de calor reduzidos e uma distribuição de temperatura mais uniforme através de todo o material. Esta propriedade das microondas garante na quase totalidade dos tratamentos uma melhor qualidade nutricional e organoléptica (NIOLA, 1990a).

**Tabela 3 . Espectro das radiações eletromagnéticas.**

Comprimento onda	de Freqüência	Denominação	
10000 km - 100 km	30 Hz - 3 kHz	Onda de freqüência industrial e acústica para telefone	
100 km - 10 km	3 kHz - 30 kHz	Onda miriamétrica VLF	
10 km - 1 km	30 kHz - 300 kHz	Onda quilométrica LF	
1 km - 100 m	300 kHz - 3 MHz	Onda hectamétrica MF	
100 m - 10 m	3 MHz - 30 MHz	Onda decamétrica HF	
10 m - 1 m	30 MHz - 300 MHz	Onda métrica VHF	
<b>1 m</b>	<b>300 MHz</b>	<b>Onda decimétrica UHF</b>	
<b>10 cm</b>	<b>3 GHz</b>	<b>Onda centimétrica SHF</b>	<b>MICRO</b>
<b>1 cm</b>	<b>30 GHz</b>	<b>Onda centimétrica SHF</b>	<b>ONDAS</b>
<b>1mm</b>	<b>300GHz</b>	<b>Onda milimétrica EHF</b>	
1 mm - 1 $\mu$	300 GHz - $3 \cdot 10^{14}$ Hz	Infravermelho	
1 $\mu$ - 1000 Å	$3 \cdot 10^{14}$ Hz - $3 \cdot 10^{15}$ Hz	Visível	
1000 Å - 100 Å	$3 \cdot 10^{15}$ Hz - $3 \cdot 10^{16}$ Hz	Ultravioleta	
100 Å - 0.01 Å	$3 \cdot 10^{16}$ Hz - $3 \cdot 10^{20}$ Hz	Raios X	
0.1 Å - 0.0001Å	$3 \cdot 10^{19}$ Hz - $3 \cdot 10^{22}$ Hz	Raios $\gamma$	
0.0001 Å - 0.00001Å	$3 \cdot 10^{22}$ Hz - $3 \cdot 10^{23}$ Hz	Raios $\gamma$ cósmicos	

Fonte: NIOLA, 1990a

As vantagens da energia das microondas são muito maiores, segundo PERKIN citado por MARSAIOLI (1991) e NIOLA (1990a), que enumera várias a seguir:

1.- Penetração da energia de forma rápida. O calor gerado em todo o produto é uniforme, enquanto existe umidade.

2.- Controle instantâneo da temperatura, sendo facilmente adaptável aos sistemas automatizados. A dosagem do tratamento é mais exata.

3.- Dimensões reduzidas da câmara de aplicação para uma capacidade produtiva equivalente.

4.- Alta eficiência na conversão de energia elétrica em calor.

5.- Limpeza facilitada e de custo reduzido.

6.- Gradiente de temperatura desnecessário para efetivar o transporte da energia das microondas.

7.- As transferências de calor e de massa são independentes do fluxo de ar, o que pode resultar em economia de energia na potência do ventilador.

8.- Ausência de efeitos térmicos residuais no ambiente, uma vez desligada a emissão das microondas.

9.- Facilmente adaptável à quantidade e tipo de produto a tratar.

10.- Pode ser introduzido dentro de um processo tecnológico um estágio com energia de microondas sem grandes dificuldades, podendo-se combinar o sistema de microondas com os métodos convencionais.

Existem alguns autores como NIOLA (1990a), NUNES et alii (1996), que não concordam plenamente com algumas das vantagens citadas, e opinam que a distribuição de calor pode resultar não uniforme devido a vários fatores como: uma intensidade de campo não homogênea por reflexão das ondas dentro do aplicador, profundidade de penetração menor que a dimensão do material, heterogeneidade do produto, características geométricas do material, etc.

O número de sistemas de processamento de alimentos por microondas incrementou-se nos últimos anos de forma significativa devido essencialmente ao progresso da técnica de produção do "magnetron", peça fundamental na geração das microondas. Os novos componentes são mais resistentes e confiáveis e, portanto, ocasionam menos substituições e reparações, diminuindo muito seu custo (NIOLA, 1990a). Segundo EDGAR (1986), os aspectos favoráveis, tanto a nível econômico quanto de desenvolvimento de novas aplicações, farão com que a energia das microondas seja finalmente reconhecida e lidere novas aplicações na indústria de alimentos.

A maioria das aplicações de microondas são baseadas na rapidez de processamento, que pode não somente diminuir o custo energético, como conceder uma maior flexibilidade de produção à indústria. Se os custos operacionais de um equipamento convencional são menores que os de um equipamento a microondas para conduzir a mesma etapa de um processo, devem existir características exclusivas do produto tratado por microondas, tais como a vida-de-prateleira ou sabor melhorados, para compensar o custo adicional. A melhora de qualidade do produto somente seria considerada depois de se analisar as condições econômicas.

Outra consideração que pode ser tratada como vantagem é o espaço disponível na fábrica para a nova instalação, já que o equipamento por microondas costuma ser menor que o convencional, não sendo necessário alterar a infraestrutura básica já planejada.

Muitas vezes o equipamento de aquecimento convencional possui eficiência muito baixa, devido a fatores tais como uma taxa decrescente de secagem ou a necessidade de manter uma alta temperatura durante as interrupções da produção, por causa de um procedimento de aquecimento inicial difícil ou demorado. Resposta lenta aos ajustes também resulta em ineficiência, assim como acontece com a operação em capacidades substancialmente diferentes daquela do projeto. Em tais casos, a resposta rápida, as características de aquecimento volumétrico e o rápido aquecimento inicial do equipamento a microondas vai com certeza proporcionar uma significativa economia de custos (MARSAIOLI, 1991).

O processamento por microondas tem um futuro promissor. Todas as áreas estão testando este tipo de ondas como uma operação unitária, o que indica a expansão deste processamento nos próximos anos. As vantagens que podem incentivar o seu uso são: redução do tempo de processo, economia de espaço e energia, melhoria da qualidade, entre outras. Precisa-se de mais estudo em outras ferramentas que ajudem na aplicação das microondas, como, por exemplo, mais dados dielétricos, modelos de processamento e maior opção em aplicadores (DECAREAU, 1985).

### 2.3.2.- Propriedades elétricas e físicas dos alimentos

São constituídas por: **constante dielétrica**, a qual reflete a habilidade de um produto para armazenar energia elétrica; **fator de perda dielétrica**, que representa a capacidade de dissipação da energia elétrica como calor; **calor específico e densidade**. Estas propriedades são determinantes da profundidade de penetração das microondas, da transferência térmica convencional e da taxa global de aquecimento (NUNES et alii, 1996).



A profundidade de penetração e a uniformidade do aquecimento são reguladas pelo conteúdo em umidade, sólidos e sais, determinantes das propriedades dielétricas do alimento. Assim, os alimentos pobres em umidade, por possuírem baixa capacidade térmica, aquecem-se mais uniformemente.

As interações entre o produto e a fonte de potência das microondas são decisivas na absorção e transferência de energia nos alimentos, afetando a uniformidade da distribuição de calor durante o aquecimento. Normalmente há reflexão de um certo percentual de energia, a partir das superfícies do produto, sem que a mesma seja absorvida, o que ocasiona oscilação nos níveis de energia incidente no interior do forno, resultando em sua distribuição irregular e originando pontos quentes e frios no interior do alimento. A energia não refletida é absorvida por interações com os constituintes ativos do produto, diminuindo no seu interior à medida em que acentua-se a penetração (NUNES et alii, 1996).

Nos fornos com frequência de 915 MHz, de uso industrial, a profundidade de penetração é duas a três vezes superior aos de 2450 MHz.

### **2.3.3.- Componentes de um forno de microondas**

Os elementos principais de um sistema de aquecimento por microondas são (MARSAIOLI, 1991):

- 1.- Fonte de alimentação: fornece as tensões para o funcionamento do gerador das microondas.
- 2.- Gerador de microondas: converte a energia elétrica recebida para energia de microondas
- 3.- Seção de transmissão: transfere energia do gerador para o aplicador
- 4.- Acoplamento: melhora a eficiência de transferência da energia de microondas
- 5.- Cavidade, aplicador ou forno
- 6.- Agitador de campo: uniformiza a distribuição da energia dentro da cavidade
- 7.- Controles de operação e segurança

É possível incorporar ao aplicador outros meios auxiliares de aquecimento, tais como: grelhas elétricas, ar quente ou irradiação infra-vermelha.

#### **2.3.4.- Aplicações na indústria de alimentos**

A nível industrial podem ser encontradas aplicações em vários campos da panificação, industrialização de vegetais, carnes, pescados, e outros, em operações unitárias como: cozimento, desidratação, pasteurização, esterilização, descongelamento, etc. Algumas delas já estão sendo aplicadas a nível industrial, devido ao fato de que oferecem alguma vantagem exclusiva sobre a técnica convencional. Outras aplicações ainda estão em fase de estudo, devido à pouca conveniência econômica.

##### **2.3.4.1.- Cozimento e Branqueamento**

Segundo NIOLA, (1990b), uma aplicação muito difundida é a produção de bacon pré-cozido por microondas. Foi demonstrada a sua vantagem econômica em relação ao processo convencional.

Outro uso importante das microondas é no cozimento de peixe (como merluza e sardinha) com a vantagem de uma retenção de proteína 15% maior, e uma diminuição de peso 15% menor em relação ao processo convencional. Também podem ser cozidos legumes, cereais e produtos doces, obtendo-se uma qualidade melhorada.

Alguns produtos de panificação formulados com amido, quando cozidos da forma tradicional, não atingem a textura desejada, e o volume diminui muito devido ao tratamento prolongado, que favorece a decomposição do amido. O cozimento destes produtos por microondas evita estes problemas, acelerando a fermentação e com isso, o desenvolvimento de CO<sub>2</sub> e melhorando a textura.

O branqueamento de vegetais por microondas também foi um sucesso quanto à melhora de qualidade do produto, pelo fato de este conservar melhor as características da matéria-prima fresca. A inativação enzimática também foi garantida e o tempo de

tratamento foi menor; porém não se mostrou rentável economicamente, e não pode ser justificado exclusivamente com base na melhora de qualidade do produto (NIOLA, 1990b).

#### **2.3.4.2.- Desidratação de alimentos**

A desidratação de alimentos por microondas vem sendo aplicada com sucesso desde a década de 70, na fabricação de massa de macarrão. A crosta superficial que retarda o processo convencional não é formada, e com isso o período de secagem é muito menor (1 h, ao invés de 8 h) e o produto é totalmente cozido internamente. O consumo energético é muito menor que na desidratação convencional (20 a 25%). A qualidade do produto é superior por apresentar uma cor mais intensa e menor perda de amido durante o cozimento.

Também está sendo estudado o uso das microondas no último estágio da secagem de batata frita tipo "snack" (petisco) para aumentar a crocância do produto.

Os produtos vegetais, quando desidratados com microondas, escurecem menos, perdem menor quantidade de vitamina C e de substâncias aromáticas e por fim, sua reidratação é muito mais fácil. (NIOLA, 1990c)

#### **2.3.4.3.- Descongelamento de alimentos**

A duração do tempo de descongelamento diminui muito com o uso da energia das microondas. Este fato flexibiliza a linha de processamento, já que pode-se descongelar em pouco tempo a matéria-prima requerida pelo mercado em cada momento. Outras características que impulsionam este sistema de descongelamento são a melhoria da qualidade nutricional e organoléptica do produto e maior higiene em geral. É de grande interesse sobretudo em carne e peixe (NIOLA, 1990c).

#### **2.3.4.4.- Pasteurização e esterilização**

As operações de pasteurização e esterilização por microondas oferecem os mesmos benefícios dos métodos convencionais, preservando melhor as qualidades nutricionais e organolépticas dos alimentos. Os teores de vitaminas e de outros produtos termolábeis são pouco afetados (NUNES et alii, 1996).

### **2.3.5.- Efeitos da energia das microondas sobre a microbiota e os componentes dos alimentos**

A inativação de microorganismos pela energia das microondas resulta da desnaturação das proteínas e dos ácidos nucleicos. O envolvimento de efeitos não-térmicos das microondas nos sistemas biológicos também é mencionado com frequência em artigos especializados, embora haja divergências de resultados entre muitos autores. A literatura (DECAREAU, 1985) ainda ressalta a dependência dos binômios de tempo-temperatura, de forma equivalente à descrita no processamento tradicional, podendo os níveis de inativação ser avaliados pelos parâmetros de cinética disponíveis.

Alguns autores demonstraram que as células de microorganismos aquecidas em microondas sofreram maior grau de injúria e aumento de sensibilidade ao cloreto de sódio, tendo atribuído estes efeitos à habilidade das microondas em distribuir instantaneamente a energia térmica aos componentes subcelulares sensíveis ao calor, podendo-se considerar a existência de efeitos não térmicos das microondas. Complementarmente foram observadas outras diferenças entre o aquecimento convencional e por microondas, entre elas, um aumento significativo na quebra de lípidos e a formação de ácidos graxos livres (NUNES et alii, 1996). Em relação à resistência de microorganismos frente a tratamentos térmicos, não se observa qualquer diferença entre o aquecimento convencional e por microondas: mofos, leveduras e vírus são mais termossensíveis que as bactérias (NUNES et alii, 1996).

Pesquisas sobre as propriedades elétricas de sistemas biológicos não dão suporte à possibilidade da existência de efeitos não-térmicos nos níveis moleculares ou celulares, reforçando o fato de que não seriam originados compostos tóxicos para a saúde. A possibilidade de ocorrerem tais fatos é remota, uma vez que os níveis quânticos de energia de microondas são inferiores aos necessários para promover a quebra de ligações químicas dos compostos (NUNES et alii, 1996; LORENZ, 1976; CROSS & FUNG, 1982).

As mudanças dos componentes principais dos alimentos foram analisadas em alimentos tratados por microondas. CROSS & FUNG (1982) e LORENZ (1976) fizeram uma revisão completa do efeito das microondas na umidade, nitrogênio animal e não animal, carboidratos, vitaminas, minerais e lipídios. Mais recentemente, YOSHIDA et alii (1992, 1993), estudaram as variações da composição dos lipídios de óleos submetidos a aquecimento por microondas, em função da degradação do tocoferol inicialmente presente.

Em todos os artigos relacionados, aparecem dados variáveis do efeito das microondas em função do alimento estudado e do tratamento realizado.

A perda de umidade na maioria dos tipos de carne foi maior naquelas amostras tratadas por microondas do que naquelas tratadas convencionalmente (KORSCHGEN & BALDWIN, 1978, citados por CROSS & FUNG, 1982) ; porém, em vegetais a diferença em perda de umidade foi muito pequena quando tratados por microondas submersos em água, com respeito àqueles tratados da forma tradicional.

Não existiu diferença na quantidade de aminoácidos essenciais entre vegetais, carnes e pescados liofilizados, tratados por microondas e convencionalmente (BODWELL & WOMAK, 1978, citados por CROSS & FUNG, 1982). Porém foi constatada uma menor perda de proteínas em peixe quando descongelado por microondas, que por processamento em água (BEZASON, 1980, citado por CROSS & FUNG, 1982).

O estudo do nitrogênio não animal foi realizado em quatro variedades de batata submetidas a três tratamentos convencionais diferentes: fervida em água com casca, fervida em água sem casca e assada no forno, frente ao tratamento por microondas. O resultado foi de uma maior retenção de proteína nas batatas tratadas com microondas (TOMA et alii, 1978 citado por CROSS & FUNG, 1982). Na mesma revisão, outros autores também constataram um maior valor nutritivo do feijão tratado por microondas. A literatura não reporta nenhuma diferença na quantidade de carboidratos entre alimentos processados convencionalmente e por microondas.

Os alimentos aquecidos por microondas retém, na grande maioria dos casos mais vitaminas (tanto lipossolúveis quanto hidrossolúveis) que aqueles tratados de forma convencional (CROSS & FUNG, 1982; LORENZ, 1976).

O grau de oxidação de lipídios, perda de gordura e incremento em ácidos graxos livres foram estudados, e, em todos os casos, os efeitos das microondas foram menores que os efeitos do tratamento térmico convencional (BOWERS, 1972 citado por CROSS & FUNG, 1982). Não pode ser determinado um comportamento geral comparativo em relação à quantidade de gordura depois dos tratamentos pois varia em função do procedimento, tipo de produto, condições, etc. (CROSS & FUNG, 1982).

YOSHIDA et alii (1992, 1993), estudaram a diminuição de tocoferóis em diferentes óleos durante o tratamento por microondas, como medida da oxidação dos mesmos. Em todos os casos houve uma degradação térmica do óleo, contudo, determinaram que quanto maior é o grau de ácidos poliinsaturados, maior é a oxidação (maior perda de tocoferol).

## **2.4.- COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS FLUIDOS**

### **2.4.1. Introdução**

A viscosidade é uma propriedade física muito importante relacionada com a qualidade do produto final. Os dados reológicos são necessários para o projeto e avaliação dos equipamentos e tubulações na indústria.

A viscosidade pode ser definida como a resistência ao escoamento ou também como atrito interno entre moléculas individuais num produto fluido. Seguindo a definição de Maxwell, a viscosidade é a força tangencial requerida para movimentar com velocidade constante uma placa em relação a uma outra num sistema de duas placas paralelas separadas por uma distância conhecida, contendo um fluido entre elas (KLEINERT, 1969).

A força por unidade de área necessária para produzir o movimento é chamada de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ). Esta tensão é proporcional ao gradiente de velocidade aplicado, também chamado taxa de deformação ( $\gamma$ ). O coeficiente de proporcionalidade entre eles é o coeficiente de viscosidade ( $\mu$ ). Temos que:

$$\tau \text{ (Pa)} = \mu \text{ (Pa.s)} \cdot \gamma \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Equação 1

Os fluidos que obedecem a esta equação são chamados de newtonianos. Os materiais não-newtonianos podem ser classificados em duas categorias: os independentes do tempo, para os quais a viscosidade aparente à temperatura constante depende apenas da taxa de deformação, e os dependentes do tempo, cuja viscosidade aparente depende da magnitude e do tempo de cisalhamento. Os fluidos não-newtonianos independentes do tempo são divididos em pseudoplásticos ("shear-thinning"), quando ocorre uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, e dilatantes ("shear-thickening") quando esta aumenta à medida que aumenta a taxa de deformação (RAO, 1982). Os fluidos dependentes do tempo são classificados em tixotrópicos, para os quais a viscosidade aparente diminui com o tempo de aplicação da força, sendo este comportamento reversível e reopéticos, que são aqueles fluidos nos quais a viscosidade aparente aumenta com o tempo de medição (RAO, 1977).

Para caracterizar fluidos não-newtonianos, pode ser usada a viscosidade aparente ( $\eta$ ) a uma taxa de deformação determinada. A temperatura constante, a viscosidade aparente de fluidos independentes do tempo depende somente da taxa de deformação:

$$\eta = \tau / \gamma$$

Equação 2

Os produtos podem apresentar adicionalmente uma tensão inicial que deve ser vencida antes de começarem a escoar. Estes fluidos têm um comportamento característico da sua estrutura interna, a qual é capaz de impedir o escoamento para uma tensão de cisalhamento menor do que um valor determinado, próprio de cada

substância, chamado de limite de escoamento ("yield value",  $\tau_0$ ). Para valores maiores de tensão de cisalhamento, a estrutura interna colapsa, permitindo o escoamento (GASPARETTO & GEHRKE, 1995).

A reologia de qualquer sistema é avaliada pela medida e análise das curvas de comportamento obtidas usando um reômetro adequado. Para caracterizar o comportamento de materiais não-newtonianos, precisamos de um reômetro que possa medir o comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento com controle de temperatura.

#### **2.4.2.- Comportamento reológico do chocolate**

A quase totalidade dos trabalhos consultados referem-se apenas ao comportamento reológico do chocolate. Uma vez que a massa de cacau, antes da extração da manteiga, é o principal componente do chocolate, consideraremos, em princípio, que o modelo reológico do chocolate (modelo de Casson), seja similar ao da massa de cacau.

A viscosidade do chocolate e suas propriedades reológicas em geral são influenciadas, segundo CHEVALLEY (1975), por algumas variáveis (tanto de composição como de processo) como: conteúdo de matéria graxa, conteúdo de umidade, presença de lecitina e outros emulsificantes, tempo de conchagem, características de temperagem, distribuição do tamanho de partícula, temperatura, etc.

O primeiro modelo usado para determinar a viscosidade do chocolate fundido foi o modelo de Bingham e posteriormente foi adotado o modelo de Casson (STEINER, 1958 citado por CHEVALLEY, 1975). Em 1973, a Office International du Cacao et du Chocolat (OICC, 1973), escolheu o modelo de Casson como oficial para a determinação das propriedades reológicas do chocolate. Reologicamente o chocolate fundido é caracterizado como fluido de Casson, dentro do grupo dos fluidos não Newtonianos. O modelo de Casson é definido pela seguinte equação reológica de escoamento, para viscosímetros cilíndricos rotativos.



$$\tau^{0.5} = (\eta_{CA} \cdot \gamma)^{0.5} + \tau_{CA}^{0.5}$$

Equação 3

Onde:

- $\gamma$ : taxa de deformação ( $s^{-1}$ )
- $\eta_{CA}$ : viscosidade plástica de Casson (cP)
- $\tau$ : tensão de cisalhamento ( $D/cm^2$ )
- $\tau_{CA}$ : limite de escoamento de Casson ( $D/cm^2$ )

Os dados obtidos são representados graficamente, e então calculados os parâmetros de Casson (ROBBINS, 1979):

- Limite de escoamento de Casson: é a quantidade de força que deve ser aplicada para a massa fluida começar a escoar, medida em dina/cm<sup>2</sup>.
- Viscosidade plástica de Casson: é a quantidade de força que tem que ser aplicada para manter constante o fluxo da massa fluida, medida em poise. Segundo a IOCC representa o valor limite da viscosidade de uma substância a um gradiente de velocidade infinito.

A relação entre ambos o limite de escoamento e a viscosidade plástica de Casson, determina o comportamento do chocolate em uma situação específica. É importante conhecer as perdas de chocolate ao esvaziar um tacho, saber a capacidade que o chocolate tem para entrar no molde, a dificuldade de eliminar as bolhas de ar, a quantidade de cobertura que vai ficar na base do bombom depois de escoar, etc.

STEINER em 1972, (citado por CHEVALLEY 1991), sugeriu que não existe um único índice de fluidez que determine uma relação linear perfeita em todos os produtos derivados de cacau. O resultado de um teste interlaboratorial determinou que o melhor índice de fluidez varia entre 0,5 e 0,7 na equação de Casson. Nenhuma alternativa à mesma foi aceita. STEINER propôs em 1972 que deveria ser usada uma fórmula geral de Casson como modelo reológico para o chocolate fundido, mantendo

um índice geral de fluidez de 0,5:

$$\tau^k = (\eta_{\infty} \cdot \dot{\gamma})^k + \tau_y^k$$

**Equação 4**

Onde:

$\tau$  : tensão de cisalhamento

$k$  : índice de fluidez

$\eta_{\infty}$  : viscosidade a tensão infinita

$\dot{\gamma}$  : gradiente de velocidade ou taxa de deformação

$\tau_y$  : limite de escoamento

Lembramos que:

Se  $k = 0,5$  obtém-se a equação de Casson

Se  $k = 1$  obtém-se a equação de Bingham

Para poder obter resultados corretos, o fluxo do chocolate entre os dois cilindros deve ser laminar e o esforço de cisalhamento deve ser maior que  $K_0^2 / a^2$ , sendo "a" a relação entre os raios dos cilindros do viscosímetro.

O cálculo dos parâmetros de Casson pode ser simplificado com o uso de gráficos específicos chamados de nomogramas, ou com programas muito simples de computador que fornecem o coeficiente de linearidade da amostra. Contudo, a equação de Casson não tem sido totalmente aceita. Existem pois, outras equações que podem descrever melhor o comportamento do chocolate fluido. Recentemente, Zangger propôs uma equação generalizada de Casson com três parâmetros:  $\eta$ ,  $f$  e  $z$ .

$$\dot{\gamma} = (\tau^2 - f^2)^{1/2} / \eta$$

**Equação 5**

onde:

$\dot{\gamma}$  : gradiente de velocidade ou taxa de deformação

$\tau$  : tensão de cisalhamento

$f$  : constante da equação de Zangger

$z$  : constante da equação de Zangger

$\eta$  : viscosidade

A maioria destas equações alternativas não são muito práticas em geral, sendo justificado o uso da equação de Casson para as medições rotineiras de caracterização de propriedades de fluência do chocolate.

A experiência demonstra que a equação de Casson sempre ofereceu resultados concordantes com a prática. Foram examinadas dezenas de amostras de chocolate, e obteve-se um coeficiente de correlação linear médio de 0,9994 para a linha de regressão dos pontos experimentais. Contudo, alguns autores ainda tem dúvidas a respeito do significado do valor mínimo de Casson (BECKETT, 1988).

### **2.4.3.- Fatores que afetam a viscosidade**

#### **2.4.3.1.-Temperatura**

Um dos fatores que mais pode afetar o comportamento reológico de um material qualquer é a temperatura, devendo ser mantida constante durante todas as medições, especialmente dos materiais gordurosos como o cacau.

#### **2.4.3.2.- Teor de manteiga de cacau**

As propriedades químicas da manteiga de cacau são de grande importância, já que a manteiga de cacau é uma das principais responsáveis pela viscosidade e pelo sabor característico do produto, além de dar-lhe brilho e conservá-lo, devido principalmente à presença de tocoferol, vitamina considerada um bom antioxidante natural (MINIFIE, 1970).

A manteiga de cacau tem a propriedade de se contrair quando solidifica, o que é de vital importância na fabricação de chocolates tanto moldados quanto recobertos. Esta contração será maior se a temperagem for a adequada, provocando a cristalização na forma mais estável.

A relação quantitativa e qualitativa entre o conteúdo de manteiga de cacau e as propriedades reológicas foi estudada, analisando-se os parâmetros de Casson, em

alguns tipos de chocolate com conteúdo de gordura variando entre 32 a 48%. Os resultados mostraram a existência de uma relação de diminuição uniforme, tanto para a viscosidade aparente quanto para o limite de escoamento, porém influenciadas pela granulometria da massa de cacau (TSCHEUSCHNER & WÜNSCHE, 1979). Segundo TANERI (1976), mantendo a temperatura constante, a diminuição da viscosidade em função do aumento do conteúdo de manteiga de cacau segue um comportamento exponencial.

#### **2.4.3.3.- Teor de umidade**

A viscosidade aparente do chocolate aumenta com o conteúdo de umidade. FINKE (1965) & LINKE (1970) in CHEVALLEY (1975) determinaram que a viscosidade atinge um mínimo a 1,0 - 1,1% de umidade e aumenta para valores maiores de água. Para valores menores de umidade (0,6%) pode-se considerar a viscosidade constante, igual à obtida para 1,0% de umidade (TANERI, 1976). O valor do limite de escoamento aumenta constantemente com o incremento de umidade. Quando a umidade atinge a 5% na massa de cacau, a viscosidade cai.

A umidade é, juntamente com a temperatura, o parâmetro que mais influencia a viscosidade. Seu efeito não é totalmente reversível, portanto a viscosidade de um "líquor" de 1% de umidade será sempre menor que a de outro de 2% submetido a tratamento térmico até atingir 1% de umidade (TANERI, 1976).

#### **2.4.3.4.-Tamanho de partícula**

A influência do tamanho de partícula foi estudada por NIEDEK (1968,1970) e KOVACIK (1973) citados por CHEVALLEY (1975). Nestes estudos observou-se que quando o tamanho da partícula da massa de cacau diminui, a viscosidade de Casson também decresce. Se as outras variáveis forem mantidas constantes, o limite de escoamento segue o mesmo tipo de comportamento. De acordo com CAMPBELL (1973) citado por CHEVALLEY (1975), a redução do tamanho das partículas de cacau além de 12,5 $\mu$  não contribui mais para a ruptura de células de gordura e pode aumentar muito o valor do limite de escoamento. Para tamanhos menores, a viscosidade aumenta.

Também foi observado que, quanto menor é a partícula, melhor é a extração da manteiga de cacau e a pulverização da massa de cacau (TANERI, 1976).

#### **2.4.3.5.- Tixotropia**

Este fenômeno é a diminuição da viscosidade do produto com o tempo. É comum, mas pouco quantificado. Aparece quando o chocolate é agitado por muito tempo, para realizar a medida da viscosidade. Alguns autores (FINKE, 1965 & LINKE, 1970 citados por CHEVALLEY, 1974) consideram este fenômeno como um erro de medida do aparelho devido à formação de uma camada de produto ao redor do cilindro interno do reômetro, provocando deslizamento da amostra e, portanto, uma diminuição aparente da viscosidade. É recomendável aguardar um tempo determinado antes de realizar as medições.

#### **2.4.3.6.- Outros**

Outros parâmetros que afetam a viscosidade do "líquor" são: a temperatura da amostra, a idade da massa de cacau, a temperatura e umidade durante a armazenagem e o efeito residual da umidade. Estes são importantes, mas, em nosso caso, não mudaram porque as condições de temperatura e umidade foram iguais, a umidade da massa não foi modificada e a moagem das amostras foi realizada no mesmo dia e no mesmo moinho.

### **2.4.4.- Medida da viscosidade do chocolate**

A viscosidade do chocolate é medida na maior parte das vezes usando viscosímetros de rotação, que podem ser classificados da seguinte forma:

#### **2.4.4.1.- Viscosímetros cilíndricos**

- a.- O copo externo gira e a força de cisalhamento transmitida é medida no cilindro coaxial interno. (Viscosímetro MacMichael)
- b.- Um fluido localizado na parte anular entre dois cilindros concêntricos sofre cisalhamento já que o cilindro interno gira, enquanto o externo permanece

estacionário. A taxa de cisalhamento é estabelecida com um motor de transmissão de engrenagem. Neste caso a força de cisalhamento ( $\tau$ ) é medida através de uma mola instalada no cilindro interno que gira e é proporcional ao par de torção, que também é proporcional à leitura do viscosímetro (Viscosímetro Brookfield, Contraves e Haake).

São feitas medidas de velocidade angular do cilindro em movimento e do torque necessário para manter esta aceleração constante. Estas medidas são utilizadas para fornecer a curva de comportamento do produto sob o cisalhamento (torque vs. rotação).

A relação entre raios ( $a$ ) deve ser o mais próxima de 1. Uma relação,  $a$ , menor que 0,5 deve ser descartado porque a relação de Casson (Eq. 3) poderia perder a linearidade para valores baixos de taxa de cisalhamento (shear rate), menores que  $0,7 \text{ s}^{-1}$  (ROBBINS, 1979). A importância de usar valores pequenos de taxa de cisalhamento pode ser facilmente entendida pelo fato de que o valor do limite de escoamento é determinado por extrapolação da correlação linear para valor de taxa de cisalhamento zero. É importante que o experimento tenha o maior número possível de pontos, incluindo toda a faixa de velocidades.

As constantes de proporcionalidade entre valores estão muito relacionadas com a geometria do viscosímetro; portanto, se os componentes do aparelho mudam a sua geometria, por quedas por exemplo, estas constantes específicas de cada instrumento mudam também.

Na medida da viscosidade de chocolates espessos, a tixotropia (diminuição da viscosidade devida à agitação) pode ser fonte de erros adicionais. Para minimizar esse erro é recomendado pela CMA e pela NCA (1988), pré-cisalhar a amostra. Consegue-se maior reprodutibilidade dos dados quando a amostra é submetida a uma quantidade conhecida de cisalhamento (Brookfield a 50 rpm durante 3 minutos).

O reômetro mais usado e recomendado pelas instituições responsáveis pela produção de chocolate a nível mundial é o de cilindros concêntricos rotatório.

Este tipo de reômetro é utilizado no método para determinação do limite de escoamento de Casson e a viscosidade aparente do chocolate pela " Office International du Cacao et du Chocolat" (OICC, 1973), pela "Chocolate Manufacturers Association" (CMA) e pela "National Confectioners Association" (NCA).

O reômetro usado nesta tese é o modelo Brookfield RVDV-III, capaz de fornecer 2500 medições de velocidades a intervalos entre 0,1 e 250 rpm. O intervalo de viscosidade abrangido pelo aparelho é o compreendido entre 100 cP e  $4 \cdot 10^6$  cP.

#### **2.4.4.2.- Viscosímetros de cone e placa.**

Este instrumento mede o par motor da reação recebida devido à tração viscosa de um cone que gira no fluido. Como vantagem, apresenta uma taxa de cisalhamento uniforme; porém a medição é mais complexa.

### **3.- MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1.- MATERIAL**

##### **3.1.1.- Amêndoas de Cacau**

Foram utilizadas amêndoas de cacau fermentadas e secas, de variedade "Forastero" fornecidas por INDECA SA, indústria processadora de cacau localizada em Embú, SP.

##### **3.1.2.- Equipamentos e aparelhos**

Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Frutas, Hortaliças e Produtos Açucarados e no Laboratório de Microondas, da FEA-UNICAMP, Campinas, SP.

- Forno rotativo de microondas, de operação contínua, projetado e montado pelo Laboratório de Microondas do DEA/FEA/UNICAMP.

- Torrador rotativo elétrico de laboratório, PROBAT-WERKE .

- Reômetro Brookfield RVDV-III.

- Vibrador de peneiras Produtest.

- Moinho de facas ICMA, tipo Rietz.

- Moinho IKA-UNIVERSAL MÜLHE M20. Janke &Kunkel GmbH u. CoKG.

- Moinho de rolos resfriados DRAIS-WERKE GMBA - MANHEIM WALDO.

- Separador de testa e cotilédons de amêndoas por fluxo de ar, fabricado no DTA/FEA/UNICAMP.

- Mesa densimétrica vibradora, BLASI Tipo GS.500, pertencente a FEAGRI.

- RMN BRUKER - minispec pc 120.

- Medidor de umidade 701 KF Titrino - Metrohm.

- Termopares.

- Extrator de gorduras tipo Soxhlet Fanem, modelo 170-1.



- Bloco digestor de proteínas TECHNICOM - BD - 40.
- pH-metro Micronal, modelo B - 374.
- Mufla Engro, modelo 355 - L.
- Estufa Fanem, modelo 315 - SE.
- Centrífuga Fanem, modelo 204 - N.
- Balança semi-analítica Mettler - Toledo modelo AB 204.
- Microscópio de luz incidente com retícula microscópica incorporada.
- Outros aparelhos e materiais comuns de laboratório e planta piloto.

### **3.1.3.- Reagentes**

Os reagentes utilizados nas análises químicas foram aqueles próprios para análise (p.a.) e de diferentes procedências: Merck, Cinética Química Ltda e Grupo Química.

## **3.2.- MÉTODOS**

Foram realizados testes de torração de cacau através de forno contínuo de microondas e do processo convencional, em forno elétrico, sendo que para ambos os casos utilizaram-se amêndoas inteiras e amêndoas fragmentadas ("nibs").

As amêndoas inteiras e os "nibs" foram torrados no forno microondas e no forno elétrico e foram realizadas análises quanto aos conteúdos de gordura e umidade, tamanho de partícula e viscosidade.

Todas as análises foram realizadas em triplicata.

### **3.2.1.- Preparo da matéria-prima**

A matéria-prima fornecida por INDECA S.A. foi limpa usando uma mesa vibratória densimétrica cedida pela FEAGRI, marca BLASI. As amêndoas foram

selecionadas por tamanho, e foram descartadas as menores. Posteriormente foi feita uma limpeza manual do material escolhido, sendo retiradas as matérias estranhas como paus e restos de folhas. A matéria prima limpa foi armazenada na câmara fria do DTA a 5°C em duplo saco plástico.

Os “nibs” foram obtidos por quebra das amêndoas limpas em moinho de facas tipo Rietz e posterior remoção da testa (casca) mediante um separador por fluxo de ar.

### **3.2.2- Características físicas e químicas das amêndoas de cacau**

As características físico-químicas foram avaliadas utilizando-se os métodos analíticos descritos a seguir:

#### **3.2.2.1.- Teor de umidade**

O conteúdo de umidade da amostra foi obtido pelo método gravimétrico por diferença de peso após secagem em estufa a 105°C, até peso constante. Método 14.004 da AOAC (1984). O teor de umidade das amostras foi medido usando o método 977.10 da AOAC (1990), Karl Fischer Method.

#### **3.2.2.2.- Medida de pH**

O pH da amostra foi medido no filtrado de uma diluição de 10g de amostra em 90ml de água fervente, à temperatura de 20-25°C, segundo o método 13.010 da AOAC - OICC.

#### **3.2.2.3.- Acidez total titulável**

A acidez total titulável da massa de cacau crua foi medida usando o método descrito por LOPEZ & QUESNEL (1973).

#### **3.2.2.4.- Teor de proteína**

O teor de proteína foi determinado pelo método micro Kjendal, baseado em hidrólise e posterior destilação da amostra, segundo o método 13.011 da AOAC (1984).

### **3.2.2.5.- Teor de gordura**

O teor de gordura foi calculado por extração com Soxhlet durante 9 horas e posterior evaporação do solvente, segundo o método 13.012 da AOAC - OICC (1984).

### **3.2.2.6.- Teor de cinzas**

O teor de cinzas foi calculado aplicando o método 13.013 da AOAC-OICC (1984). A amostra foi primeiro carbonizada em cadinho de porcelana previamente tarado e depois aquecida na mufla a 600°C até peso constante.

### **3.2.2.7.- Teor de fibras**

O teor de fibras da massa de cacau foi calculado usando aparelho de refluxo e aplicando o método "Acid Detergent Fibre" (ADF) ( Agriculture Hand Book 75, 1970).

### **3.2.2.8.- Cálculo dos componentes da amêndoa**

Foram pesadas três amostras de 100g, separadas manualmente as testas, cotilédone e gérmen e pesadas as frações.

### **3.2.2.9.- Densidade aparente**

A densidade aparente do cacau, tanto das amêndoas, quanto dos "nibs" foi tomada medindo a massa de material em uma proveta de dois litros.

### **3.2.2.10.- Teste de corte**

Foi realizado o teste de corte das amêndoas de cacau seguindo o método descrito por CAMPOS, (1974).

## **3.2.3.- Torração**

As amêndoas de cacau já fermentadas e secas, foram torradas em duas formas diferentes:

- a) Amêndoas inteiras.

b) Amêndoas quebradas em fragmentos de 3 a 6 mm, chamados “nibs”. Estes fragmentos foram descorticados e degerminados. A degerminação dos fragmentos também foi realizada para evitar problemas no equipamento devido à excessiva dureza do germen de cacau. Estas separações foram feitas por diferença de densidade, com o auxílio de uma coluna de ar e por peneiras. Os fragmentos ainda foram separados por tamanho, sendo que aqueles com 3 a 6 mm foram selecionados, e os maiores submeteram-se novamente a quebra. A seguir eles foram torrados.

A torração foi efetuada em dois equipamentos diferentes:

### **3.2.3.1.- Torração em forno elétrico rotativo intermitente**

Foi realizada simulando um tratamento industrial convencional, das amêndoas inteiras e fragmentadas. Todos os trabalhos de pesquisa a nível de laboratório encontrados na literatura utilizaram forno elétrico. Os parâmetros que foram estudados são tempo de processo, que variou de 34 a 44 min, e temperatura de 150°C na camisa do forno, de acordo a testes preliminares, que descartaram tempos menores nas condições de operação do forno.

Foram estudados vários tempos de torração: 30 - 34 - 36 - 38 min para “nibs”, e 36 - 40 - 42 - 44 min para amêndoas inteiras. Os melhores resultados foram obtidos para 38 e 44 minutos respectivamente. Após ensaios prévios, foram descartadas as amostras de “nibs” torrados durante 30 minutos e amêndoas por 36 minutos por mostrar clara evidência de falta de tratamento.

### **3.2.3.2.- Torração em forno rotativo contínuo de microondas**

A torração foi realizada de forma contínua, sendo que os parâmetros de processo, como tempo, temperatura, rotação e quantidade mínima de produto necessário, foram determinados em ensaios práticos prévios.

A variável do processo estudada foi a intensidade de potência de microondas aplicada aos “nibs” (2600, 2800 e 3000 kW) e às amêndoas (2800, 3000 e 3200 kW). Se considerarmos a vazão mássica de cada tipo de produto, a variável real foi a

densidade de potência aplicada ao cacau. Os valores de densidade de potência equivalentes às intensidades aplicadas são observados na **Tabela 11**.

O equipamento utilizado neste estudo foi um protótipo de forno cilíndrico rotativo, com possibilidade de combinar microondas e ar quente, operando a 2450 MHz e a potência das microondas aplicada foi na faixa de 2500 a 3200 kW. A potência de microondas foi ajustada no gerador (Cober, modelo S6F), com potência de saída variável entre 0,5 e 6 kW e frequência de 2450 MHz. Dois medidores portáteis de potência transmitida e refletida (Cober, modelo PM-IR), ligados a um acoplador duplo no guia de onda, foram usados para controlar a eficiência de transferência da potência para a carga. A potência média transmitida manteve-se dentro de um padrão de 90% ou mais da potência total (soma da transmitida e refletida).

Determinou-se previamente a composição do material para calcular o calor específico do mesmo, para conhecer a quantidade de energia que pode ser absorvida pelo cacau. Com este dado, determinou-se o tempo de residência e a densidade de potência requerida, em W·h/kg.

Depois da calibração prévia do alimentador, foram determinados os parâmetros próprios do forno de microondas. Em função do calor específico e da densidade aparente do produto, foi determinada a capacidade do forno. Foram fixadas a velocidade de rotação e a inclinação do cilindro. Com esses dados, e determinando a porcentagem de ocupação do forno, decidimos a vazão de produto. Foram realizados testes de distribuição de partículas durante o processamento, ou seja, tempo de residência dentro do cilindro. Considerando a razão da potência de microondas aplicada pela vazão mássica do produto processado, conhecemos a densidade de potência recebida pelo produto.

A temperatura do produto foi controlada na saída do cilindro com termômetro de vidro convencional a mercúrio. A fim de diminuir o erro, a amostra foi coletada numa garrafa térmica para medida da temperatura .

7 copias  
 TIRA R.  
 da inclinação com que contava o aparelho, foram determinadas as **ilindro** para os tempos de residência médios de 5 e 10 minutos, seguinte equação (DASCALESCU, 1969):

$$\theta_m = (K L) / (n \operatorname{tg} \alpha D_i)$$

**Equação 6**

= tempo de residência médio do processo (min)

= constante para secadores cilíndricos ( $\cong 0,5$ ).

= comprimento do cilindro (1.3 m)

= rotação do cilindro (rpm)

$\alpha = \operatorname{sen} \gamma / \operatorname{sen} \rho$  (0.0361)

= ângulo inclinação do cilindro (1.189°)

= ângulo de talude do material (33°)

= diâmetro int. do cilindro (0.3 m)

ENC.  
 9 copias  
 -se uma avaliação da distribuição do tempo de residência nas rotação e alimentação pré-determinadas, através de um teste onde foram mostras previamente marcadas. Aguardou-se trinta minutos até o ntrar em regime, logo foi introduzida uma amostra de 100 gramas de is à velocidade do alimentador, e observou-se o escoamento por 20 i coletadas amostras em vidros a cada 15 segundos, e contabilizada a "nibs" marcados que apareceram. O mesmo experimento foi realizado doas marcadas.

O cacau, tanto em "nibs" quanto em amêndoas foi introduzido na cavidade do forno de microondas através do alimentador, com uma velocidade pré-determinada. A potência foi aplicada desde o primeiro minuto. Esperou-se vinte minutos até coletar a primeira amostra, durante dez minutos (até obter aproximadamente 2 kg de material), depois mudou-se a potência e esperou-se por cerca de 15 minutos até considerar que a nova potência aplicada tinha atingido a toda a amostra. Depois foi recolhida nova amostra por 10 minutos e assim sucessivamente.

### **3.2.4.- Determinação da viscosidade**

Após a torração, as amêndoas descorticadas e degerminadas, e os fragmentos das amêndoas ou "nibs", foram moídos em moinho de rolos resfriados, (modelo DRAIS-WERKE GMBA - MANHEIM WALDO, emprestado por SANBRA S.A.) até a maioria das partículas atingirem um tamanho inferior a  $40\mu$ . Obtida a massa de cacau, foram realizadas as medidas de viscosidade aparente, através de um reômetro do tipo de cilindros rotatórios coaxiais, modelo Brookfield RV-DVIII dotado de adaptador de pequenas amostras. O espaço anular entre os cilindros estava dentro das recomendações (OICC, 1973), sendo que a relação entre os raios dos cilindros usados foi de 0.75. O "líquor" ou massa de cacau é cisalhado neste espaço anular pelo cilindro interno, que gira com uma velocidade estabelecida previamente.

#### **3.2.4.1.- Calibração do viscosímetro**

O reômetro Brookfield RVDV-III usado nesta tese, foi calibrado previamente conforme ao especificado no manual do equipamento fornecido junto com ele. Foram usados dois padrões da mesma marca, de viscosidade conhecida, 952 cP e 12400cP. Foram realizadas 5 medições a diferentes rotações do aparelho para determinar se os valores estavam dentro do intervalo de validade calculado em função do possível erro contido no fluido e no reômetro.

Depois de realizados os cálculos, o equipamento foi considerado calibrado, já que os valores de viscosidade obtidos estavam dentro do intervalo determinado.

#### **3.2.4.2.- Parâmetros para a medida da viscosidade**

Foi realizado o número mais conveniente de medidas, criando um programa baseado nas recomendações pela bibliografia ( NCA/CMA Viscosity Subcommittee, 1988) para medição da viscosidade de chocolate fundido mantendo a temperatura constante ( $40 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ). As medições foram realizadas na faixa de gradiente de velocidade (D) entre  $2,40 - 60 \text{ s}^{-1}$ .

### 3.2.4.3.- Preparo da amostra

As amêndoas e os “nibs” torrados e moídos foram armazenados na câmara fria do DTA, sob condições determinadas de umidade e temperatura.

Cada amostra foi aquecida dentro de vidro tampado em banho termostático a 65°C até atingir a fluidez necessária para introduzi-la no porta amostras. Uma vez fluida, a tampa do vidro era retirada e imediatamente a amostra era colocada no cilindro, introduzido o cilindro interno ou “spindle”, e aguardava-se a temperatura atingir os  $40 \pm 0,1^\circ\text{C}$  na amostra.

### 3.2.4.4.- Roteiro para determinação da viscosidade

A amostra foi introduzida no porta amostras do reômetro e submetida ao programa referenciado no item 3.2.4.2., apresentado a seguir:

a.- Homogeneização da temperatura da amostra durante 3 minutos a 5 rpm até atingir  $40 \pm 0,1^\circ\text{C}$

b.- Pré-cisalhamento da amostra a 50 rpm durante 3 minutos.

c.- Medida a 125 rpm durante 3 segundos

d.- Medida a 100 rpm durante 3 segundos.

e.- Medida a 50 rpm durante 6 segundos

f.- Medida a 20 rpm durante 15 segundos

g.- Medida a 10 rpm durante 30 segundos

h.- Medida a 5 rpm durante 60 segundos

i.- Medida a 7,5 rpm durante 45 segundos

j.- Medida a 10 rpm durante 30 segundos

k.- Medida a 15 rpm durante 25 segundos

l.- Medida a 20 rpm durante 15 segundos

m.- Medida a 30 rpm durante 15 segundos

n.- Medida a 40 rpm durante 10 segundos

o.- Medida a 50 rpm durante 6 segundos.

p.- Medida a 60 rpm durante 6 segundos

q.- Medida a 70 rpm durante 5 segundos



- r.- Medida a 80 rpm durante 5 segundos
- s.- Medida a 90 rpm durante 4 segundos
- t.- Medida a 100 rpm durante 3 segundos
- u.- Medida a 110 rpm durante 3 segundos
- v.- Medida a 125 rpm durante 3 segundos

Os passos a e b são preparativos para conseguir uma amostra uniforme e a temperatura constante. O pré-cisalhamento é realizado para quebrar possíveis estruturas internas e para eliminar as bolhas de ar que possam ter sido incluídas na dosagem da amostra.

Os passos c a g foram usados para determinar o possível comportamento tixotrópico da massa de cacau fluida por semelhança com o chocolate.

As medidas h a v foram realizadas em sentido inverso às iniciais, e foram usadas para a determinação dos parâmetros de Casson, com ajuda de representação gráfica.

A temperatura da amostra foi mantida constante circulando-se água na camisa em volta do cilindro externo, usando um banho termostático regulado a 41°C.

O reômetro mede a força de cisalhamento realizada sobre o alimento sob estas condições. Posteriormente foram representadas as curvas da força realizada pelo cilindro interno em função do gradiente de velocidade.

Utilizando estas representações gráficas, foram determinados os parâmetros de Casson, limite de escoamento e viscosidade aparente, que definem o comportamento do fluido, neste caso, da massa de cacau.

Também foi representada graficamente a influência do tempo no comportamento reológico do material, ou seja, a tixotropia apresentada pela massa de cacau, evidenciada por uma diminuição da viscosidade aparente com o tempo.

### **3.2.5.- Análises realizadas nas amostras**

Os fatores que mais influenciam a viscosidade da massa de cacau são: o conteúdo de matéria graxa (conforme 3.2.2.5), a umidade (conforme 3.2.2.1) e o tamanho de partícula. Estas análises foram realizadas em todas as amostras. Como a umidade não foi uniforme entre as amostras, estas foram aquecidas em estufa por 7 horas a 60°C com a finalidade de diminuir e uniformizar a umidade entre elas. Posteriormente a umidade foi medida de novo.

#### **3.2.5.1.- Tamanho da partícula**

O tamanho de partículas foi determinado pelo método baseado na referência de KLEINERT (1969) modificado, usando um microscópio de luz incidente com retícula microscópica incorporada. A amostra foi espalhada num porta amostras de vidro com ajuda de uma gota de glicerina, e esperou-se por 5 minutos antes de observar no microscópio. Foram observados quatro campos de 2 mm<sup>2</sup> em cada amostra e realizada uma média do número de partículas maiores de 20µm.

Este método consistiu simplesmente de uma comparação entre as amostras, com a finalidade de descobrir alguma possível diferença entre o número de partículas maiores de 20µm presentes em cada amostra. O número de partículas menores que este tamanho não pode ser determinado devido à baixa resolução ótica do aparelho.

Todas as amostras foram moídas no mesmo dia com o mesmo moinho de rolos resfriados (pertencente a SANBRA).

#### **3.2.5.2.- Curva de sólidos da manteiga de cacau**

- Curva de sólidos da manteiga de cacau das amostras torradas em "nibs" - método IUPAC 2150 (ex 2.323) citada por PAQUOT & HAUTFENNE (1987).

A manteiga de cacau das amostras de "nibs" selecionadas torradas por via convencional a 34, 36 e 38 min e a das amostras torradas por microondas a 2600, 2800 e 3000 kW foi extraída com éter de petróleo e posteriormente filtrada. O solvente

foi evaporado e a manteiga introduzida nos tubos de RMN (Ressonância Magnético Nuclear).

Todas as amostras sofreram uma temperagem prévia à medição segundo AOCS/IUPAC, que consistiu de:

- a) Fundição da amostra a 80°C durante 30 min.
- b) Amostra mantida em banho a 60°C durante 5 min.
- c) Amostra mantida em banho a 0°C durante 90 min.
- d) Amostra mantida em banho a 26°C durante 40 horas.
- e) Amostra mantida em banho a 0°C durante 90 min.

Após a correta temperagem, as amostras foram mantidas por 60 minutos em banho a cada temperatura de medição: 20, 25, 30, 32.5, 35 e 40°C. O método indicou o intervalo de temperatura de medidas entre 5 e 60°C. Estas temperaturas foram escolhidas por estar referenciadas em BECKETT (1994).

### **3.2.6.- Análise sensorial para determinação do tempo de torração**

Com a finalidade de determinar a faixa de potências de microondas e os tempos mais adequados de tratamento no forno elétrico, foram apresentadas as amostras prévias a três "experts" em aroma e sabor de "líquor" de cacau (Cargill, SP; Cargill, BA e INDECA, SP). Desta forma foram descartadas as amostras cruas e algumas supertorradas. As amostras definitivas, dentro dos intervalos determinados pelos especialistas, foram analisadas novamente pelos mesmos, e determinou-se qual a amostra de melhor qualidade.

A seguir, as amostras torradas nos diferentes equipamentos e estados (amêndoas inteiras, fragmentadas e moídas) foram analisadas sensorialmente, em uma tese de mestrado paralela (FADINI, *no prelo*) usando o mesmo material, para determinar os parâmetros característicos das amostras torradas em forno de microondas e complementar desta forma o estudo da torração por este novo método.

## 4.- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1.- CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

#### 4.1.1.- Análises químicas e físicas

Foram realizadas análises químicas para caracterização da matéria-prima em base úmida apresentadas na **Tabela 4**, assim como uma caracterização física das amêndoas utilizadas quanto ao percentual de componentes mostrada na **Tabela 5**.

Observa-se que o cacau usado pode ser considerado um produto comercial típico, sendo que o rendimento do material aproveitado no experimento foi de 74,5% de "nibs" com granulometria entre 2 e 6 mm.

**Tabela 4.** Composição química da amêndoa

Compostos	%
Lipídios	50,18
Cinzas	2,63
Proteínas	17,78
Umidade	6,69
Outros Carboidratos	17,54
Fibras	5,18

**Tabela 5.** Constituição da amêndoa

Componentes	amêndoa inteira(%)	após torração(%)
Testa	14,91	0,95
Gérmen	0,94	0,23
Cotilédone	84,15	98,82

#### 4.1.2.- Teste de corte

Foi realizado o teste de corte ("cut test") da matéria prima em triplicata, considerando 100 amêndoas em cada análise. O resultado aparece na **Tabela 6**. O tamanho das amêndoas, embora uniforme foi pequeno considerando que o peso de 100 amêndoas foi de 95,5 g. Outra característica destacável da matéria prima foi a ausência de odores estranhos e presença de um bom aroma típico de cacau.

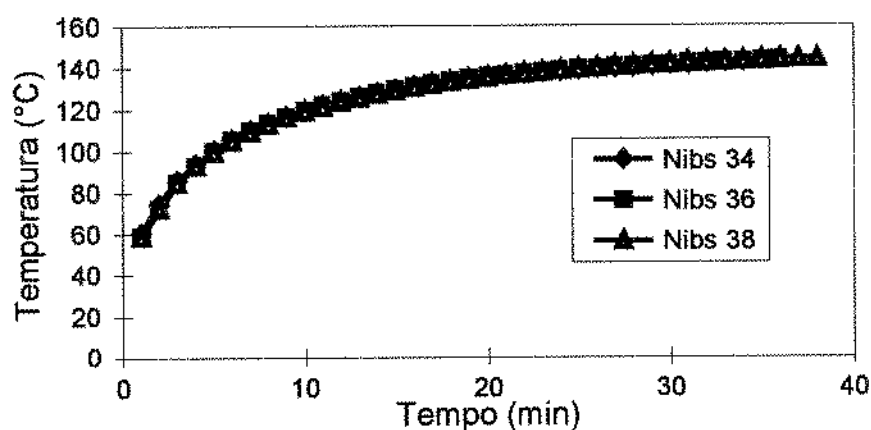
**Tabela 6.** Resultados da prova de corte do cacau usado na tese.

Defeitos característicos das amêndoas	Núm.de amêndoas defeituosas
Mofadas	0,0
Danificadas por insetos	1,5
Ardósias	0,0
Germinadas	0,0
Achatadas	0,0
Pouco fermentadas	4,5

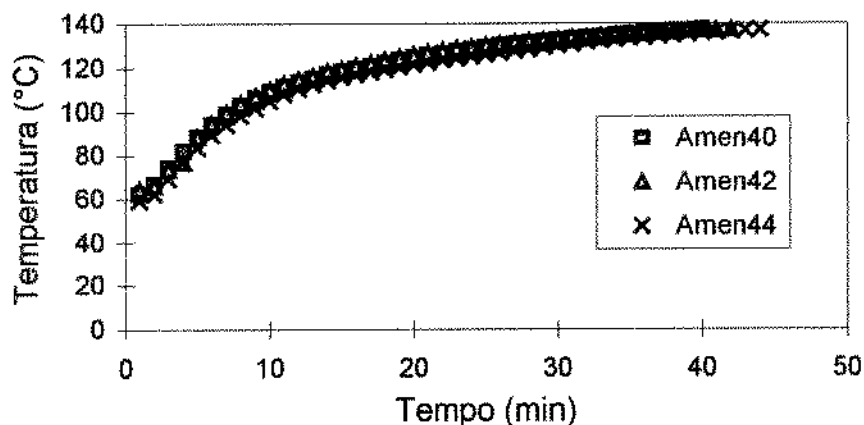
## 4.2.- TORRAÇÃO

### 4.2.1.- Torração convencional

A torração, tanto das amêndoas inteiras, quanto dos "nibs" foi feita em forno elétrico realizada à temperatura constante de 150 °C na camisa do forno. O perfil de temperatura originado dentro da cavidade, ao longo do processo, foi controlado através de um termopar digital. Os perfis de temperatura obtidos estão apresentados nas **Figuras 2 e 3**. A máxima temperatura atingida dentro da câmara de torração foi de 143,6 °C para os "nibs" e de 134,1 °C para as amêndoas inteiras.



**Figura 2.** Valores médios de temperatura dentro da cavidade do forno elétrico rotativo durante a torração dos "nibs".



**Figura 3.** Valores médios de temperatura dentro da cavidade do forno elétrico rotativo durante a torração das amêndoas inteiras.

O perfil de temperatura no interior da cavidade teve um comportamento constante em todas as torrações como pode ser observado nas figuras 2 e 3. Este fato foi muito importante devido a que mostra a boa reprodutibilidade do equipamento. Além do mais, devido à capacidade do equipamento (250g), eram necessárias oito torrações para completar os 2 kg necessários de cada amostra usada no experimento. Considerando esta constância do forno, as amostras foram consideradas uniformes. Quando houve alguma variação anômala da temperatura ou algum problema com fumaça, o lote foi descartado e repetido.

#### 4.2.2.- Torração por microondas

##### 4.2.2.1.- Calibração do alimentador

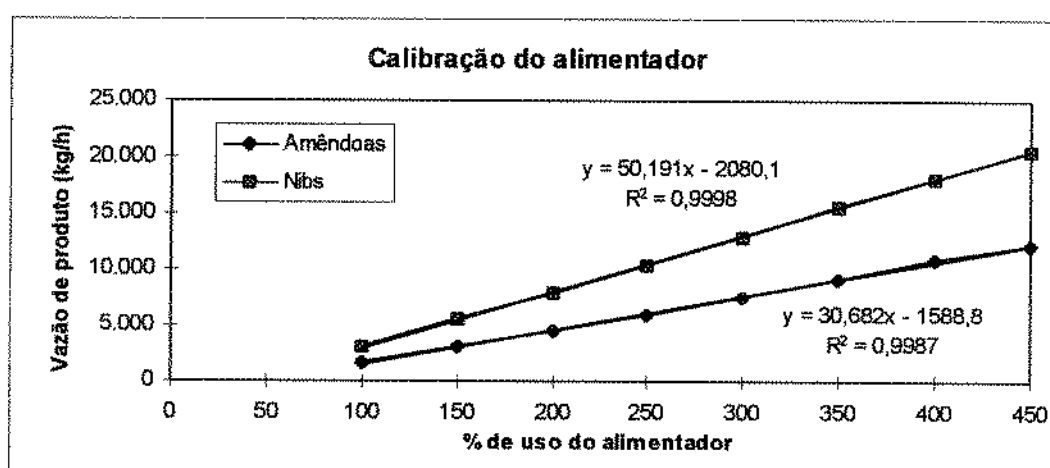
No processo de torração por microondas o alimentador utilizado foi calibrado para várias velocidades, em função do percentual de uso do mesmo. O resultado aparece na **Tabela 7** e na **Figura 4**.

Para confrontar estes dados com a prática foi realizado um teste de tempo de residência das amêndoas e dos "nibs" relatado no item 4.3.3.

**Tabela 7.** Valores de calibração do alimentador do microondas

Capacidade (%)	Vazão amêndoas inteiras (kg/h)	Vazão "nibs" (kg/h)
100	1,608	3,054
150	3,030	5,484
200	4,484	7,902
250	5,940	10,320
300	7,468	12,918
350	9,195	15,504
400	10,920	17,994
450	12,144	20,604

Estes valores foram plotados e então calculados os parâmetros de regressão linear do alimentador que aparecem na **Figura 4**. Como pode ser observado em função do coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ), o comportamento do alimentador foi mais linear para os "nibs" que para as amêndoas. Este fato foi devido ao tamanho irregular das amêndoas, ao seu caráter quebradiço e fundamentalmente ao diâmetro da rosca do alimentador, muito próximo do tamanho médio das amêndoas, fatores que dificultaram uma alimentação mais uniforme.

**Figura 4.** Curvas de calibração do alimentador para "nibs" e amêndoas.

#### 4.2.2.2.- Determinação dos parâmetros de operação

A partir da inclinação com que contava o aparelho, foram determinadas as **rotações do cilindro** para os tempos de residência médios de 5 e 10 minutos, utilizando-se a equação de DASCALESCU, (1969) apresentada no item 3.2.3.2.

Obteve-se para um tempo de residência médio ( $\theta_m$ ) de:

$\theta_m = 10$  min. uma rotação do cilindro ( $n$ ) de 5.68 rpm.

$\theta_m = 5$  min. uma rotação do cilindro ( $n$ ) de 11.37 rpm.

Foi escolhido o tempo de residência médio do processo de 10 minutos com a finalidade de facilitar o controle dos testes a serem realizados posteriormente.

A **vazão mássica** foi determinada em função da densidade aparente e da porcentagem de ocupação do cilindro. O volume do cilindro rotativo é de 91,7 litros, mesmo considerando que para testes de secagem uma ocupação entre 7,5 e 8,0% pode ser considerada ideal (MISKELL & MARSHALL, 1956), optou-se por utilizar apenas 4% de ocupação (3,668 litros) devido à pouca quantidade de material disponível. As densidades aparentes dos "nibs" e das amêndoas inteiras são 0,52 e 0,50 kg / l respectivamente. Os dados utilizados estão resumidos na **Tabela 8**:

**Tabela 8.** Condições do processo por microondas

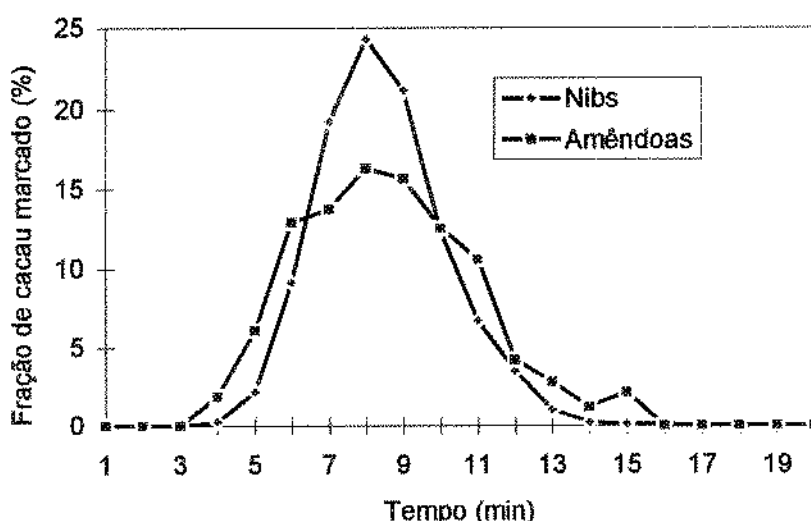
Tipo de Produto	Massa retida no cilindro (kg/10min)	Vazão mássica (kg/h)	Porcentagem do alimentador
"Nibs"	1,91	11,44	265
Amêndoas	1,83	11,01	418

#### 4.2.2.3.- Avaliação do tempo de residência

Após a determinação da capacidade do alimentador para os "nibs" e para as amêndoas inteiras, fez-se testes práticos para verificar se a vazão mássica encontrava-se realmente dentro do esperado.



Realizou-se uma avaliação da distribuição do tempo de residência nas condições de rotação e alimentação pré-determinadas. O resultado da porcentagem de "nibs" e de amêndoas em função do tempo após a introdução do primeiro "nib" encontra-se representado graficamente na **Figura 5**. Como pode ser observado na **Tabela 9**, o tempo de residência médio dos "nibs" ficou ao redor de nove minutos, enquanto que as amêndoas, na **Tabela 10** ficaram menos tempo dentro do forno. Este fato é devido à heterogeneidade e ao tamanho das amêndoas inteiras em comparação com os "nibs". Também explica o fato de que as amêndoas precisaram de maior potência de microondas para atingirem um ponto de torração similar às amostras de "nibs". Seria interessante conseguir exactamente um tempo de residência de 10 minutos e ver se a potência requerida para a torração é menor.



**Figura 5.** Distribuição dos tempos de residência dos "nibs" e amêndoas no forno de microondas.

#### 4.2.2.4.- Condução da torração

A partir dos dados das **potências de microondas** aplicadas a cada tratamento, foram calculadas as respectivas densidades de potência (**Tabela 11**) através do quociente da potência pela vazão mássica de cada tratamento. As temperaturas de saída do produto para cada densidade de potência aplicada estão apresentadas na mesma tabela. Pode ser observado que as temperaturas atingidas pelos "nibs" e pelas amêndoas são levemente inferiores que as atingidas no torrador

elétrico. Este fato pode influir positivamente no sabor do produto oferecendo um cacau mais suave.

**Tabela 9.** Porcentagem de "nibs" marcados, determinando o tempo de residência médio da amostra no interior do microondas.

Tempo (min)	Porcent. "nibs"	Tempo (min)	Porcent. "nibs"
1	0,00	11	6,70
2	0,00	12	3,50
3	0,00	13	1,00
4	0,24	14	0,20
5	2,20	15	0,10
6	9,10	16	0,10
7	19,20	17	0,04
8	24,30	18	0,02
9	21,10	19	0,02
10	12,30	20	0,00

**Tabela 10.** Porcentagem de amêndoas marcadas, determinando o tempo de residência médio da amostra no interior do microondas.

Tempo (min)	Porcent. amêndoas	Tempo (min)	Porcent. amêndoas
1	0,00	11	10,55
2	0,00	12	2,90
3	1,89	13	1,21
4	6,08	14	2,16
5	12,87	15	0,00
6	13,69	16	0,00
7	16,30	17	0,00
8	15,66	18	0,00
9	12,47	19	0,00
10	4,22	20	0,00

**Tabela 11.** Densidade de potência de microondas aplicada aos "nibs" e às amêndoas e temperatura de saída do produto após 10 minutos de torração.

Amostra N°	Tipo de produto	Densidade de Pot. (Wh/kg)	Potência aplicada (W h)	Temperatura saída (°C)
1	<b>"nibs"</b>	218,53	2500	113,0
2		227,27	2600	118,5
3		244,75	2800	122,0
4		262,23	3000	127,0
5	<b>Amêndoas</b>	236,27	2600	123,0
6		254,45	2800	126,0
7		272,63	3000	132,0
8		290,80	3200	134,0

#### **4.3.- ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS**

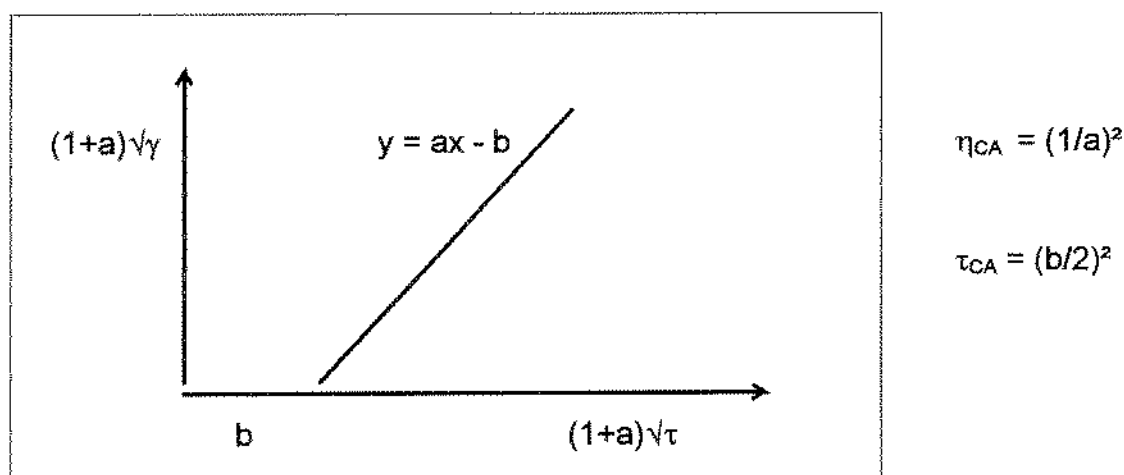
As amostras obtidas após torração e moagem foram analisadas quanto a quantidade de gordura, teor de umidade e tamanho de partícula segundo os métodos citados no item 3.2.2. Os resultados de umidade e de teor de gordura estão relatados nas **Tabelas 12 e 13** junto aos valores de viscosidade plástica e limite de escoamento de Casson.

A umidade inicial das amostras após torração foi bastante heterogênea devido principalmente aos diferentes tempos e potências aplicados. A umidade influencia muito a viscosidade, portanto, teve que ser necessariamente modificada, da forma relatada no item 3.2.5., para poder analisar a viscosidade sem contar com a influência desta variável.

O tamanho de partícula não mostrou nenhuma diferença significativa quando comparados os diferentes tratamentos. Esperava-se que o tratamento por microondas provocasse uma estrutura no cotilédone mais porosa, e portanto um tamanho de partícula menor.

#### 4.4.- MEDIDA DA VISCOSIDADE

A amostra era depositada no copo do viscosímetro. Uma vez atingida a temperatura certa ( $40 \pm 0,1^\circ\text{C}$ ), começava-se a medição ativando o programa pré-estabelecido no reômetro, descrito no item 3.2.4. Obtidos os valores de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e de taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ), foram representados graficamente segundo a equação de Casson (  $(1+a)\sqrt{\tau}$  vs.  $(1+a)\sqrt{\dot{\gamma}}$  ). Desta forma obteve-se a linha de tendência de cada gráfico composta pela inclinação (que aporta o valor da viscosidade plástica de Casson,  $\eta_{CA}$ ) e por uma constante (que representa o limite de escoamento,  $\tau_{CA}$ ).



**Figura 6.** Reograma de Casson segundo a OICC.

FONTE: BECKETT, 1988

Os resultados destes parâmetros, assim como os valores de umidade e gordura de cada amostra obtidos são apresentados nas **Tabelas 12 e 13**. No apêndice B aparecem todas as equações obtidas em todas as amostras medidas (por triplicata) assim como os gráficos correspondentes.

As amostras iniciais obtidas, tanto por torração convencional como por microondas, homogeneizadas em relação a umidade ficaram na faixa entre 1,7 e 1,8%, eliminando-se assim a influência deste parâmetro sobre a viscosidade.

**Tabela 12 .** Valores de umidade, gordura, viscosidade plástica de Casson (Poise), limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de "nibs" torrados convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.

<i>Amostra</i>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Gordura (%B.S.)</b>	<b>Viscosidade (P)</b>	<b>Limite de escoamento (<math>D/cm^2</math>)</b>
<b>Torrção Convencional (tempo em minutos)</b>				
"Nibs" 34	1,70	53,01	43,8980	0,4752
"Nibs" 36	1,71	53,26	41,5633	0,5203
"Nibs" 38	1,85	54,19	31,7393	0,5785
<b>Torrção por microondas (potência em Wh)</b>				
"Nibs" 2600	1,69	53,00	39,8053	0,8416
"Nibs" 2800	1,81	53,27	29,7784	0,9375
"Nibs" 3000	1,76	53,63	24,9927	0,8825

**Tabela 13 .** Valores de umidade, gordura, viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de amêndoas torradas convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.

<i>Amostra</i>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Gordura (%B.S.)</b>	<b>Viscosidade (P)</b>	<b>Limite de escoamento (<math>D/cm^2</math>)</b>
<b>Torrção Convencional (tempo em min.)</b>				
Amêndoas 40	1,83	54,01	63,1736	0,5109
Amêndoas 42	1,73	53,54	48,8317	0,5714
Amêndoas 44	1,81	54,27	36,0397	0,8926
<b>Torrção por Microondas (potência em Wh)</b>				
Amêndoas 2800	1,76	53,85	30,9595	0,8745
Amêndoas 3000	1,78	53,29	26,7301	0,8154
Amêndoas 3200	1,84	53,20	20,0687	1,0059

#### 4.4.1.- Efeito do grau de torração

O tempo de torração a que são submetidas as amostras quando torradas da forma convencional e a densidade de potência, quando tratadas no microondas pode ser considerado como um fator que influencia a viscosidade plástica de Casson da massa de cacau. Este fato pode ser observado nas **Tabelas 12 e 13**, considerando sempre uma umidade semelhante entre elas. Se a umidade difere muito entre as amostras não podemos determinar a influência do grau de torração. Uma vez observados os valores de viscosidade podemos concluir que a viscosidade plástica de Casson diminui quando aumenta o grau de torração em massa de cacau proveniente tanto de amêndoas quanto de "nibs" torrados em microondas ou em forno elétrico convencional.

$$\eta \text{ Amêndoas } 40 > \eta \text{ Amêndoas } 42 > \eta \text{ Amêndoas } 44$$

$$\eta \text{ Amêndoas } 2800 > \eta \text{ Amêndoas } 3000 > \eta \text{ Amêndoas } 3200$$

$$\eta \text{ "nibs" } 34 > \eta \text{ "nibs" } 36 > \eta \text{ "nibs" } 38$$

$$\eta \text{ "nibs" } 2600 > \eta \text{ "nibs" } 2800 > \eta \text{ "nibs" } 3000$$

As **Tabelas 12 e 13** nos mostram que o limite de escoamento aumentou com o tempo de torração, nas massas de cacau obtidas de "nibs" torrados da forma tradicional. Porém, em massa de cacau obtida de "nibs" torrados por microondas, praticamente não mudou. Em amêndoas o efeito do grau de torração é semelhante tanto em torração convencional quanto por microondas. O valor do limite de escoamento tende a aumentar com o grau de torração, se bem que entre as duas amostras menos torradas de cada método permanece praticamente constante. Podemos considerar um efeito não muito claro devido talvez ao tipo de viscosímetro usado.

$$\tau \text{ "nibs" } 34 < \tau \text{ "nibs" } 36 < \tau \text{ "nibs" } 38$$

$$\tau \text{ "nibs" } 2600 \cong \tau \text{ "nibs" } 2800 \cong \tau \text{ "nibs" } 3000$$

$$\tau \text{ Amêndoas } 40 \cong \tau \text{ Amêndoas } 42 < \tau \text{ Amêndoas } 44$$

$$\tau \text{ Amêndoas } 2800 \cong \tau \text{ Amêndoas } 3000 < \tau \text{ Amêndoas } 3200$$

#### **4.4.2.- Efeito da umidade**

O efeito da umidade sobre a viscosidade é bem conhecido. Aumentando a umidade da massa de cacau, aumenta a viscosidade plástica de Casson. Em todas as amostras de "líquor" proveniente de "nibs" torrados tanto convencionalmente quanto por microondas, a viscosidade plástica de Casson diminuiu de forma diretamente proporcional com o teor de umidade. No caso do "líquor" proveniente das amêndoas, as amostras seguiram o mesmo comportamento. Foi possível a observação do fato porque, conforme apresentado no item 4.5., as amostras iniciais não tiveram o mesmo teor de umidade. Contudo a viscosidade foi medida, e os parâmetros de Casson calculados. Desta forma pode-se observar, na tabela do apêndice A, a diminuição da viscosidade plástica ao diminuir o teor de umidade das amostras.

O efeito da umidade sobre o valor do limite de escoamento não teve um comportamento de tendência definida. Em "líquor" obtido de amêndoas, o valor deste parâmetro diminuiu levemente ou permaneceu constante com a diminuição de umidade.

#### **4. 4. 3.- Efeito do tipo de torração (tradicional ou por microondas)**

A torração por microondas, processo utilizado considerando constantes os outros parâmetros, ofereceu produtos menos viscosos que a torração convencional. A única amostra convencional que ofereceu uma viscosidade menor que "nibs" 2600, foi a "nibs" 38, mas é facilmente compreensível considerando o fato de que a "nibs" 2600 é uma amostra insuficientemente torrada e a viscosidade aumenta quando o grau de torração diminui. Considerando as massas provenientes de cacau torrado em amêndoas, as diferenças em viscosidade são muito grandes. As amostras torradas por microondas apresentam uma viscosidade muito menor que aquelas torradas em forno elétrico. O valor do limite de escoamento em geral, apresentou um comportamento oposto, sendo maior nas amostras de líquor torradas por microondas, tanto em amêndoas como em "nibs".

#### 4.4.4.- Efeito do tipo de material torrado ("nibs" ou amêndoas)

A viscosidade das amostras de "líquor" proveniente de cacau torrado em amêndoas inteiras sempre foi maior que a das amostras provenientes de "nibs", quando torradas em forno elétrico. Quando a torração foi realizada em microondas, os valores de viscosidade foram, em geral levemente menores para a massa proveniente de amêndoas inteiras que para aquela proveniente de "nibs". Este fato é industrialmente importante e será discutido no próximo item.

O valor do limite de escoamento resulta semelhante em amostras torradas tradicionalmente, tanto em amêndoas como em "nibs". O mesmo comportamento encontramos nas amostras torradas por microondas.

#### 4.4.5.- Discussão

A diferença de viscosidade observada entre as amostras torradas por microondas e aquelas torradas convencionalmente em forno elétrico rotativo foi evidente. Na **Tabela 14** podemos observar a viscosidade plástica das amostras avaliadas pelo painel sensorial que foram consideradas com um grau de torração semelhante, N38 ("nibs" torrados por 38 minutos em forno elétrico), A44 (amêndoas torradas por 44 minutos em forno elétrico), N2800 ("nibs" torrados com 2800 W de potência de microondas) e A3200 (amêndoas torradas com 3200 W de potência de microondas).

A amostra A3200 conta com a menor viscosidade plástica das quatro amostras avaliadas sensorialmente, e com o maior limite de escoamento. Esta redução de viscosidade pode ser relacionada com a porcentagem de manteiga de cacau que produziria este mesmo efeito. TANERI (1976) mostra a viscosidade da amostra em função da quantidade de manteiga de cacau, à temperatura de 40°C, na **Tabela 15**.



**Tabela 14.** Parâmetros de Casson das quatro amostras analisadas sensorialmente.

<b>Amostra</b>	<b>Viscosidade (P)</b>	<b>Limite de escoamento (D/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>N38</b>	31,7393	0,5785
<b>A44</b>	36,0473	0,8926
<b>N2800</b>	29,7673	0,9375
<b>A3200</b>	20,0756	1,0059

**Tabela 15.** Viscosidade plástica em função da porcentagem de gordura do “líquor”:

<b>Manteiga de cacau (%)</b>	50,20	52,80	54,10	56,10	58,10	59,10
<b>Viscosidade (P)</b>	115,50	65,80	49,95	32,50	21,20	17,32

(Fonte: TANERI, 1976)

Comparando a melhor amostra representativa do tratamento mais usado na indústria em termos de sabor (N38), e a amostra que apresentou uma menor viscosidade com características de sabor semelhantes (A3200), podemos nos referir à faixa de viscosidade entre 32,5 e 21,2 P apresentada na **Tabela 15**. Esta diminuição de viscosidade é devida a um aumento do teor de manteiga de cacau da amostra em 2% (56,1 a 58,1). Isto significaria que a viscosidade da amostra A3200 (20,0156 P) poderia ser obtida pela amostra N38 (31,7393 P) se adicionarmos 2% de manteiga de cacau. Esta afirmação que está relacionando os fatos acontecidos experimentalmente neste estudo com o trabalho realizado por TANERI (1976), ajuda a explicar o fenômeno de que a menor viscosidade da amostra A3200, pode ser relacionada com uma menor adição de manteiga de cacau no processo de fabricação de chocolate, quando for necessário diminuir a viscosidade do produto. Deve-se ressaltar a grande influência que possui a manteiga de cacau nas características de viscosidade do chocolate e o alto preço desta matéria-prima no mercado.

A queda da viscosidade plástica oferece um produto com maior facilidade de transporte (considerando a mesma temperatura) e de manuseio em geral. Sob o ponto de vista tecnológico, esta massa de cacau teria aplicações diferenciadas (cobertura, por exemplo). O fato de contar com um limite de escoamento elevado,

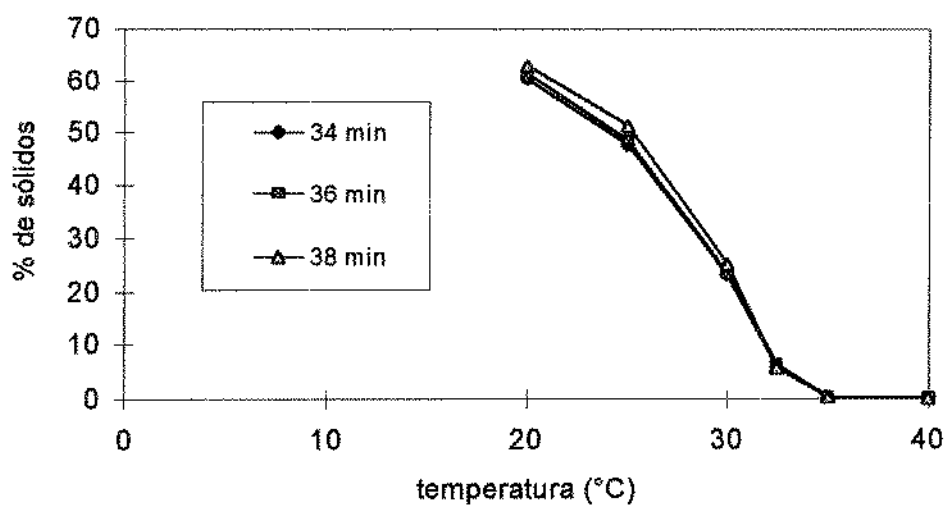
poderia ser considerado como negativo se ele fosse usado para fabricação de chocolates moldados.

#### 4.5.- CURVA DE SÓLIDOS DA MANTEIGA DE CACAU

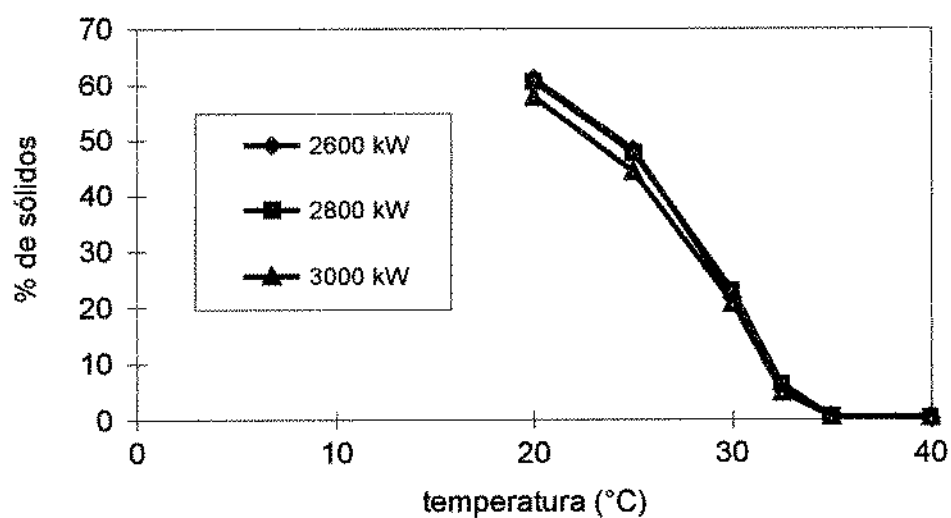
Foi determinada a curva de sólidos da manteiga de cacau extraída de todas as amostras de "nibs" torrados tanto convencionalmente quanto por microondas, a fim de determinar as possíveis causas da diferença de viscosidade entre os dois tipos de torração. A grande semelhança das curvas dos produtos torrados convencionalmente e por microondas não justificou efetuar as mesmas análises nas amêndoas. Portanto, a mudança na viscosidade observada não pode ser considerada como consequência de uma mudança da composição das gorduras, que seria indicada pelo comportamento de cristalização da manteiga de cacau. Os resultados estão apresentados na **Tabela 16** e nas **Figuras 7 e 8**. Segundo vários autores (YOSHIDA, et alii, 1993; NUNES et alii, 1996), a composição da gordura não é modificada por efeitos não térmicos da energia das microondas. A gordura é oxidada, aumentando o teor de ácidos graxos, quando aquecida, tanto no forno de microondas quanto no elétrico. Vemos nas **Figuras 7 e 8** que a porcentagem de sólidos da manteiga de cacau das amostras é independente do tratamento. Portanto podemos pensar que a estrutura do cacau foi modificada quando submetida ao efeito das microondas.

**Tabela 16.** Valores de porcentagem de sólidos na manteiga de cacau das amostras torradas em "nibs", por microondas e da forma convencional.

Temp. (°C)	Densidade de Potência (Wh/kg)			Tempo (min)		
	227,27	244,75	262,23	34	36	38
20	61,07	60,56	57,69	59,77	58,86	62,99
25	48,17	47,51	44,19	45,82	44,72	51,26
30	21,52	22,78	20,60	21,28	21,69	25,08
32,5	5,33	6,25	4,85	5,56	5,07	5,80
35	0,43	0,52	0,48	0,44	0,57	0,36
40	0,21	0,30	0,32	0,24	0,37	0,17



**Figura 7.** Curva de sólidos na manteiga de cacau dos "nibs" torrados convencionalmente.



**Figura 8.** Curva de sólidos na manteiga de cacau dos "nibs" torrados por microondas.

#### 4.6. ANALISE SENSORIAL

Foram apresentadas amostras dos tratamentos 2 (N2600), 3 (N2800), 6 (A2800) e 7 (A3000) a três especialistas industriais em sabor de "líquor" de cacau, assim como duas amostras torradas no forno elétrico em "nibs" (N36 e N38). A amostra submetida ao tratamento 3 (massa de cacau proveniente de "nibs" torrados no microondas com potência de 2800 W), foi escolhida como a melhor de todas por contar com notas de aroma de chocolate (característico de cacau bem torrado) e com um aroma ácido mais agradável que as outras amostras.

As opiniões dos especialistas foram as seguintes:

**A3000.** (Amêndoas torradas com 3000 W de potência de microondas). Amostra muito ácida, com sabor de verde, pouco torrada, adstringente, azeda, com pouco aroma de chocolate e pouco amargo, prevalecendo o sabor ácido.

**A2800.** (Amêndoas torradas com 2800 W de potência de microondas). Aroma ácido que mascara o aroma do chocolate. Quando o sabor ácido desaparece um pouco, percebe-se um pouco de sabor de chocolate, com maior intensidade que A3000.

**N2800.** ("Nibs" torrados com 2800 W de potência de microondas). É uma amostra ácida porém, menos agressiva que as outras. Possui aroma de chocolate. O sabor azedo está menos acentuado que nas outras amostras, e a adstringência é a própria do cacau. O gosto residual é de chocolate e o aroma de torrado aparece por cima do sabor ácido.

**N2600.** ("Nibs" torrados com 3000 W de potência de microondas). O aroma ácido é maior que em N2800, porém não é muito agressivo. Está menos ácido que as amostras A2800 e A3000. Tem menos aroma de torrado e menos sabor de chocolate que N2800.

**N36.** ("Nibs" torrados por 36 minutos em forno elétrico). A acidez percebida é menor que A2800, A3000 e N2600, mas é maior que a da amostra N2800. Aparece o sabor de chocolate e um pouco o azedo. Não tem nenhum sabor muito agressivo.

**N38.** ("Nibs" torrados por 38 minutos em forno elétrico). Aparece bem o aroma de chocolate e o sabor de torrado. Está menos azedo que N36, e mais ácido que N2800. Incluso aparece um pouco o gosto de sobretorrado.

Um estudo sensorial complementar foi realizado numa tese paralela, e ainda não publicada (FADINI, *no prelo*) nesta mesma faculdade, com o mesmo material. Foi realizada a seleção e o treinamento de um grupo de provadores, que analisaram quatro das amostras, duas convencionais e duas torradas por microondas. Seguindo as indicações dos especialistas, as amostras analisadas foram N38 ("nibs" torrados por 38 minutos no forno elétrico), A44 (amêndoas torradas por 44 minutos no forno elétrico), N2800 ("nibs" torrados com 2800 W de potência no forno de microondas) e A3200 (amêndoas torradas com 3200 W de potência no forno de microondas). Esta amostra A3200, foi incluída porque a amostra de amêndoas torradas com 3000 W de potência (A3000), foi considerada insuficientemente torrada pelos especialistas.

Os resultados gerais obtidos do grupo de avaliadores mostraram que o grau de torração das quatro amostras (N38, A44, N2800 e A3200) pode ser considerado equivalente, visto que não houve diferenças significativas entre elas, variando levemente a intensidade dos atributos.

## 5. CONCLUSÕES

Foi demonstrado que é possível a torração de cacau por microondas, diminuindo o tempo do processo e obtendo um produto com características sensoriais semelhantes às do produto torrado de forma convencional. Os parâmetros estudados foram o tempo de residência do produto no interior do cilindro constante (10 min.), e a potência aplicada. Foi concluído que as melhores amostras foram aquelas tratadas em amêndoas inteiras a 3200 W e em "nibs" a 2800 W.

A análise sensorial realizada com três especialistas mostrou que o sabor das amostras torradas em microondas foi similar ao do "líquor" obtido da torração convencional, apresentando como vantagem a redução de tempo deste novo processo em amêndoas inteiras e a eliminação das etapas prévias necessárias para a torração de "nibs".

Os resultados reológicos obtidos são resumidos a seguir:

A viscosidade plástica de Casson é inversamente proporcional ao grau de torração, seja na torração convencional ou por microondas. Porém o valor do limite de escoamento teve o comportamento oposto.

Tanto a viscosidade, quanto o limite de escoamento são diretamente proporcionais ao teor de umidade, portanto quando a umidade do "líquor" aumenta os parâmetros de Casson também aumentam.

Em geral, as amostras torradas por microondas tiveram um valor de viscosidade de Casson menor que aquelas torradas em forno elétrico rotativo. Porém, o limite de escoamento de Casson foi menor nas amostras torradas da forma convencional. A viscosidade das amostras torradas por microondas foi menor, isso facilita o manuseio e o transporte do "líquor" e reduz a adição de manteiga necessária para a diminuição da viscosidade.

A massa de cacau torrada convencionalmente em forma de “nibs” sempre teve uma viscosidade menor que a massa proveniente da torração convencional de amêndoas. Entre estas amostras o valor do limite de escoamento permaneceu praticamente constante.

Quando a massa provem de torração por microondas, a viscosidade das amostras torradas em amêndoas é levemente menor que a das amostras torradas em “nibs”. O valor do limite de escoamento foi semelhante para os dois tratamentos.

## **6.- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho determinou os parâmetros de torração do cacau, tanto em “nibs” quanto em amêndoas. Para trabalhos futuros, seria muito interessante um estudo mais aprofundado do aspecto econômico e energético da torração de cacau por microondas.

A temperatura real atingida pelo cacau dentro do aplicador de microondas poderia ser determinada, já que, atualmente, o Laboratório de microondas está dotado de equipamentos adequados.

Propõe-se que seja estudado o efeito das microondas sobre a estrutura interna do cacau, com a finalidade de determinar uma possível causa da diminuição da viscosidade. Seria de interesse aplicar alguma técnica de microscopia eletrônica específica para cacau, seguindo o caminho iniciado por CUNHA (1996) para secagem de café por microondas.



## 7.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAUERMEISTER, P. Cocoa Liquor Roasting. **The Manufacturing Confectioner**. v. 61, n 10, p. 43-45, Oct., 1981. Glen Rock, NJ.
2. BECKETT, S.T. **Fabricación y utilización industrial del chocolate**. 1. ed. 1988. Zaragoza. Ed. Acribia, S.A. Trad. Gonzalez, M. 432 p.
3. BECKETT, S.T. **Industrial Chocolate Manufacture and Use**. 2. ed. London, 1994. Ed Chapman & Hall. 407 p.
4. BECKETT, S.T.; PHIL, D. Particle size reduction in chocolate grinding. **The Manufacturer Confectioner**. v. 74, n. 5, p. 90-97, May., 1994. Glen Rock, NJ.
5. BERTINI, A . Roasting of Cocoa Liquor. **Alimentaria**, n. 204, p. 33-39, 1989. Barcelona.
6. CAMPOS, G.A. Padronização e classificação do cacau. **Cacau, Atualidades**. v. 2, n. 2, p. 9 - 18, Jul., 1974. Ilheus, BA, Brasil.
7. CAMPOS, M.S. **Influência da energia de microondas na qualidade tecnológica do trigo**. Campinas, 1986. 120 p. Tese Mestrado - Fac. Eng. Alim e Agríc. UNICAMP.
8. CARLIN, S.T.; HSIEH, O.A.L.; SUNG WANG, L.; HOC, T. & CHANG, S.S. Comparison of acid and basic volatile compounds of cocoa butter from roasted and unroasted cocoa beans. **J. Am. Oil Chem. Soc.** v. 63, n. 3, p. 1031-1035, Mar., 1986. Champaign, IL, USA.

9. CHEVALLEY, J. Rheology of chocolate. **Journal of Texture Studies** v. 6, n. 1, p. 177-196, Jan., 1975. Boston.
10. CHEVALLEY, J. An adaptation of the Casson equation for the rheology of chocolate. **Journal of Texture Studies** v. 22, n. 2, p. 219-229, Feb., 1991. Connecticut.
11. CHEVALLEY, J. Propiedades de fluencia del chocolate. In: BECKETT, S.T. **Fabricación y utilización industrial del chocolate**. 1. ed. 1988. Zaragoza. Ed. Acribia, S.A. Trad. Gonzalez, M. cap. 9, p. 159-177.
12. CROSS, G.A & FUNG, D.Y.C. The Effect of Microwaves on Nutrient Value of Foods. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. v. 16, n. 4, p. 327-422, Apr., 1982. Cleveland, Ohio.
13. CUNHA, M. L. **Estudo da secagem do café cereja descascado pelo processo a ar quente assistido a microondas**. Campinas, 1996. 74 p. Tese de Mestrado. Fac. Eng. Alimentos. UNICAMP.
14. DASCALESCU, A. **Le séchage et ses applications industrielles**. 1. ed. 1969. Paris: Ed Meridiane. Trad: Panaitesco, A., 536p.
15. DECAREAU, R.V. **Microwaves in the Food Processing Industry**. 1. ed. London: Academic Press, 1985. 234 p.
16. FAILLON, G.; COUASNARD, C.; MALONEY, E.D. New uses of microwave power. **Food Engineering International**, v. 3, n. 9, p. 46-48, Sept., 1978. Radnor, Pa. USA.
17. GASPARETTO, C.A.; GEHRKE, T. **Reologia**. Campinas, 1995. 19 p. Apostila. Fac. Eng.Alim. UNICAMP.

18. HOSKIN, J.C. & DIMICK, P. S. Química del desarrollo del sabor en el chocolate. In: BECKETT, S.T. **Fabricación y utilización industrial del chocolate**. 1. ed. 1988. Zaragoza. Ed. Acribia, S.A. Trad. Gonzalez, M. cap. 7, p. 121-136.
19. HUFFMAN, P. Chocolate Flavor: Practical Guide for the User. **The Manufacturing Confectioner**.v. 72, n. 4, p. 65-67, Apr., 1992. Glen Rock, NJ.
20. KEME, T. Heat treatment of cocoa - problems and controlling. **The Manufacturing Confectioner**. v. 74, n. 6, p. 101-108, Jun., 1994. Glen Rock, NJ.
21. KLEINERT, J. Particle size investigations on cocoa mass, cocoa powder and chocolate. **Revue Internationale de la Chocolaterie**. v. 25, n. 8/9, p. 274-329, Aug-Sep., 1969. Zürich.
22. KLEINERT, J. Pasta de cacao, polvo de cacao, manteca de cacao. In: BECKETT, S.T. **Fabricación y utilización industrial del chocolate**. 1. ed. 1988. Zaragoza. Ed. Acribia, S.A. Trad. Gonzalez, M. cap. 5, p. 67-98.
23. LOPEZ, A.S. & QUESNEL, V.C. Volatile fatty acid production in cacao fermentation and the effect on chocolate flavor. **J. Sci. Food. Agric**. v. 24, n. 3, p. 319-324, Mar., 1973.
24. LOPEZ, A.S. & McDONALD, C.R. Preliminary test of a simple and inexpensive system for the mechanical aeration box type cacao fermentation. **Theobroma**. v. 12, n. 2, p. 57-83, Feb., 1982.
25. LORENZ, K. Microwave heating of Foods – Changes in Nutrient and Chemical Composition. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. v. 7, n. 4, p. 339-370, Jun., 1976. Cleveland, Ohio.

26. MARSAIOLI, J.A. **Desenvolvimento de tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico - rotativo combinado com ar quente para produtos granulados.** Campinas, 1991. 197p. Tese Doutorado - Fac. Eng.Alim. UNICAMP.
  
27. MARTIN, R. J. Jr. Chocolate. **Advances of Food Research** v. 31, p. 211-342, 1987. Rhode Island. Academic Press. 507 p.
  
28. OICC. Méthodes d'analyses de l'O'ffice International du Cacao et du Chocolat. Viscosité du Chocolat - Determination de la limite l'ecoulement et de la viscosité plastique de Casson. Feuille 10 - F/1973. **Rev. Int. Choc. (RIC)** v. 28, p. 216-218, Set., 1973.
  
29. MERMET, G.; CROS, E.; GREGES, G. Etude preliminaire de l'optimisation des parametres de torrefacion du cacao. **Café, Cacao, thé.** v. 36, n. 4, p. 285-290, Out-Nov., 1992. Paris.
  
30. MINIFIE, B.W. **Chocolate, Cocoa and Confectionery: Science and Technology.** 1. ed. London: Longman Group Ltd. 1970. 624 p.
  
31. MINSON, E. Chocolate Manufacture - Beans through Liquor Production. **The Manufacturing Confectioner.** v. 72, n. 11, p. 61-67, Nov., 1992. Glen Rock.
  
32. MISKELL, F.; MARSHALL, Jr W. R. A study of retention time in a rotary dryer. **Chemical Eng. Progress,** v. 52, n. 1, p. 35-38, Jan. 1956.
  
33. MOHR, W. In MEILI, M. **Etudes des correlations entre le comportement technologique des substances aromatiques et leurs propriétés physico-chimiques.** Compiègne 1978. Thèse Docteur - Université de Technologie de Compiègne.

34. MORAES, A.S.C. **Métodos para avaliação sensorial dos alimentos**. 7. ed. Campinas: Ed. UNICAMP, 1990. 93 p.
35. NCA/CMA VISCOSITY SUBCOMMITTEE. Application of viscosity method for chocolate to the Brookfield viscometer. **The Manufacturing Confectioner** v. 68, n. 1, p. 76-81. Jan, 1988. Glen Rock, NJ
36. NIOLA, I. Il riscaldamento a microonde nel settore alimentare. Nota I. Caratteristiche generali, aspetti economici e sanitari. **Industrie Alimentari** v. 29, n. 3, p. 225-230, Mar., 1990. Pinarolo, Italia.
37. NIOLA, I. Il riscaldamento a microonde nel settore alimentare. Nota II. Controllo della carica microbica, cottura e blanching. **Industrie Alimentari** v. 29, n. 4, p. 335-338, Apr., 1990. Pinarolo, Italia.
38. NIOLA, I. Il riscaldamento a microonde nel settore alimentare. Nota III. Disidratazione, scongelamento e controllo degli insetti. **Industrie Alimentari**. v. 29, n. 5, p. 431-434, Mag., 1990. Pinarolo, Italia.
39. NUNES, I.A.; GERMANO, M.I.S.; GERMANO, P.M.L. Forno de microondas: solução ou problema para a saúde pública. **Higiene Alimentar**, v. 10, n. 42, p. 9-13, Mar-Abr., 1996. São Paulo.
40. PAQUOT, C. & HAUTFENNE, A. **Standard Methods for the Analysis of the Oils, Fats and Derivatives**. 7. ed. 1987. Paris: Ed. Blackwell Scientific Publications. p. 59-70.
41. PEZOA, N.H. **Contribution a l'étude d'un capteur por controler en continu le procédé de torrefaction**. Compiègne, France, 1989. 170 p. These Docteur - Université de Technologie de Compiègne

42. RAO, M.A. Measurement of Flow Properties of Fluid Foods - Developments, Limitations and interpretation of Phenomena. **Journal of Texture Studies** 8 (3): 257-282, sept. 1977. Connecticut.
43. ROBBINS, J.W. A quick, reliable method for measuring yield value, plastic viscosity and "Mac Michael" viscosity of chocolate. **The Manufacturing Confectioner**, 59 (5):85-90, may. 1979. Glen Rock.
44. ROSEN, M.R.; FOSTER, W.W. Approximate Rheological Characterization of Casson Fluids. **Journal of Coatings Technology**, 50 , nº 643, p. 1-10, Aug. 1978. Tarrytown, USA.
45. SCHIFFMANN, R.F. Microwave and Dielectric Drying. In: MUJUNDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 1987. cap.10, p.327-356.
46. SCHMID, H.; CHIAPPA, O. Cocoa roasting from the nibs to the liquor. **Confectionary production**, dec. : 713-716 , 1988.
47. SMIT, J. **Microondas**. Livros Érica Ed. Ltda., 1987. 135 p.
48. STAUFFER, M.B. Chocolate manufacturing: critical process controls - An overview. **The Manufacturing Confectioner** 74 (6): 92-94, jun. 1994. Glen Rock, NJ.
49. TANERI, C.E. Chocolate liquors: factors affecting viscosity. **The Manufacturing Confectioner**. 56 (3): 45-55, mar. 1976. Glen Rock, NJ.
50. THORZ, M.S.; SCHMITT, A. Thin film liquor roasting and pre-treatment technology. **The manufacturing Confectioner** 64 (6): 65-70, jun. 1984. Glen Rock, NJ.

51. TSCHEUSCHNER, D.; WÜNSCHE, D. Rheological Properties of Chocolate Masses and the Influence of some Factors, *in apud* SHERMAN, P. **Food Texture and Rheology**, 1979.
52. WILSON, L.L.; SPEERS, R.A.; TUNG, M.A. Yield stresses in molten chocolates. **Journal of Texture Studies** **24**(3): 269-286. sept. 1993. Connecticut.
53. YOSHIDA, H.; KAJIMOTO, G. & EMURA, S. Antioxidant effects of d-tocopherols at different concentrations in oils during microwave heating. **JAACS**, v. 70, n. 10, p. 989-995, Oct., 1993. Champaign, IL, USA.
54. YOSHIDA, H.; TATSUMI, M & KAJIMOTO, G. Influence of fatty acids on the tocopherol stability in vegetable oils during microwave heating. **JAACS**, v. 69, n. 2, p. 119-125, Feb., 1992. Champaign, IL, USA.
55. ZAMALLOA, C.W.A. **Caracterização físico-química e avaliação de metilpirazinas no desenvolvimento do sabor, , em dez cultivares de cacau (*Theobroma cacao*, L.) produzidos no estado de São Paulo**. Campinas 1994, 121 p. Tese Mestrado - Fac. Engenharia de Alimentos, UNICAMP.

## Apêndice A

**Tabela 17.** Valores iniciais de umidade (%), viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de "nibs" torrados convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.

<i>Amostra</i>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Viscosidade (P)</b>	<b>Lim. de esc. (<math>D/cm^2</math>)</b>
<i>Torrção Convencional (tempo em minutos)</i>			
<b>"Nibs" 34</b>	2,01	35,1438	0,5347
<b>"Nibs" 36</b>	1,63	35,3729	0,5203
<b>"Nibs" 38</b>	1,84	26,9481	0,4946
<i>Torrção por microondas (potência em W)</i>			
<b>"Nibs" 2600</b>	3,59	43,4321	0,6397
<b>"Nibs" 2800</b>	2,76	34,9714	1,1557
<b>"Nibs" 3000</b>	1,76	27,4690	1,0705

**Tabela 18.** Valores iniciais de umidade (%), viscosidade plástica de Casson (Poise) e limite de escoamento ( $D/cm^2$ ) do "líquor" obtido de amêndoas torradas convencionalmente em forno elétrico rotativo e em forno de microondas.

<i>Amostra</i>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Viscosidade (P)</b>	<b>Lim. de esc. (<math>D/cm^2</math>)</b>
<i>Torrção Convencional (tempo em min.)</i>			
<b>Amêndoas 40</b>	2,24	88,2546	0,2809
<b>Amêndoas 42</b>	2,31	67,0760	0,8765
<b>Amêndoas 44</b>	2,35	47,3662	0,5747
<i>Torrção por Microondas (potência em W)</i>			
<b>Amêndoas 2800</b>	2,15	25,5501	0,7080
<b>Amêndoas 3000</b>	2,76	34,0543	0,6150
<b>Amêndoas 3200</b>	1,70	23,7139	0,9487



## Apêndice B

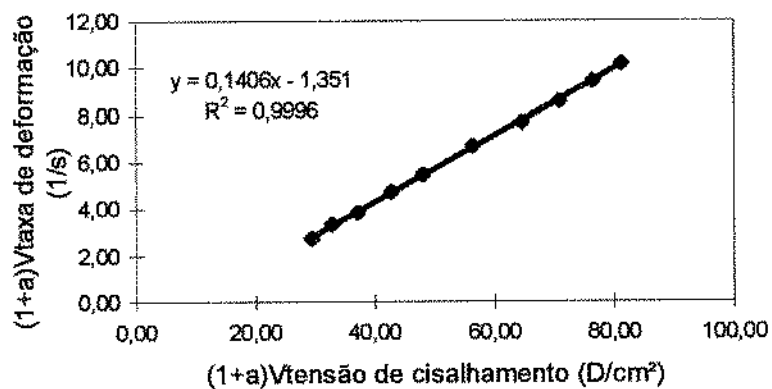
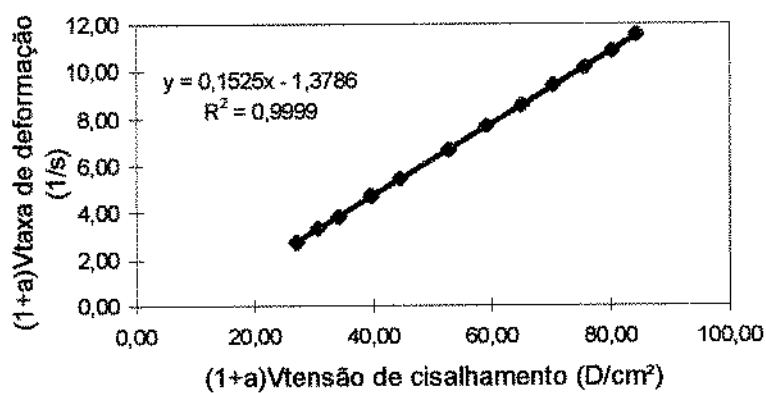
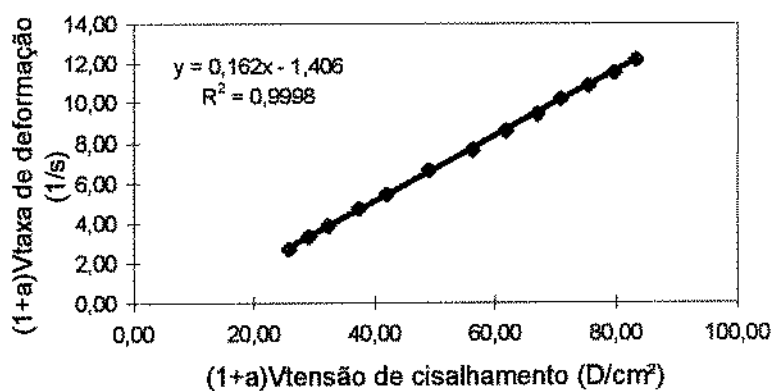
**Tabela 19.** Equações de regressão linear de Casson obtidas da medida da viscosidade de todas as amostras torradas em “nibs” tanto no microondas quanto no forno elétrico, (por triplicata).

<i>Amostra</i>	<b>Regressão Linear</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b>viscosidade plástica (P)</b>	<b>limite de escoamento (D/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>Torração Convencional (tempo em min.)</i>				
“nibs”34	$y = 0,1620x - 1,4060$	0,9998	38,1104	0,4942
	$y = 0,1525x - 1,3786$	0,9999	42,9990	0,4751
	$y = 0,1406x - 1,3510$	0,9996	50,5860	0,4563
<b>valor médio</b>			<b>43,8980</b>	<b>0,4752</b>
“nibs”36	$y = 0,1595x - 1,4988$	0,9998	39,3078	0,5616
	$y = 0,1435x - 1,3789$	0,9997	48,5620	0,4753
	$y = 0,1648x - 1,4477$	0,9997	36,8201	0,5240
<b>valor médio</b>			<b>41,5633</b>	<b>0,5203</b>
“nibs”38	$y = 0,1778x - 1,4871$	0,9998	31,6327	0,5529
	$y = 0,1668x - 1,4431$	0,9998	35,9425	0,5206
	$y = 0,1902x - 1,6272$	0,9997	27,6426	0,6619
<b>valor médio</b>			<b>31,7393</b>	<b>0,5785</b>
<i>Torração por Microondas (potência em W)</i>				
“nibs”2600	$y = 0,1583x - 1,8348$	0,9999	39,8152	0,8420
	$y = 0,1568x - 1,7842$	0,9999	40,6732	0,7958
	$y = 0,1603x - 1,8866$	0,9999	38,9164	0,8898
<b>valor médio</b>			<b>39,8053</b>	<b>0,8416</b>
“nibs”2800	$y = 0,1868x - 2,2593$	0,9997	28,6580	1,2761
	$y = 0,1792x - 1,7293$	0,9997	31,1403	0,7475
	$y = 0,1840x - 1,7763$	0,9997	29,5368	0,7888
<b>valor médio</b>			<b>29,7784</b>	<b>0,9375</b>
“nibs”3000	$y = 0,2094x - 1,9952$	0,9998	22,8059	0,9952
	$y = 0,1968x - 1,8482$	0,9996	25,8196	0,8540
	$y = 0,1948x - 1,7871$	0,9997	26,3525	0,7984
<b>valor médio</b>			<b>24,9927</b>	<b>0,8825</b>

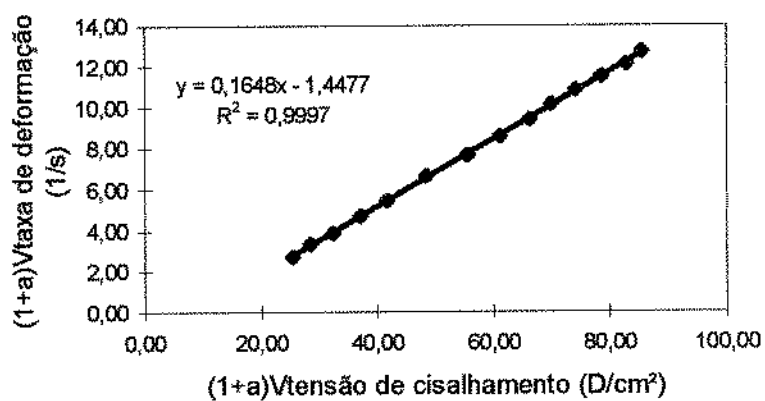
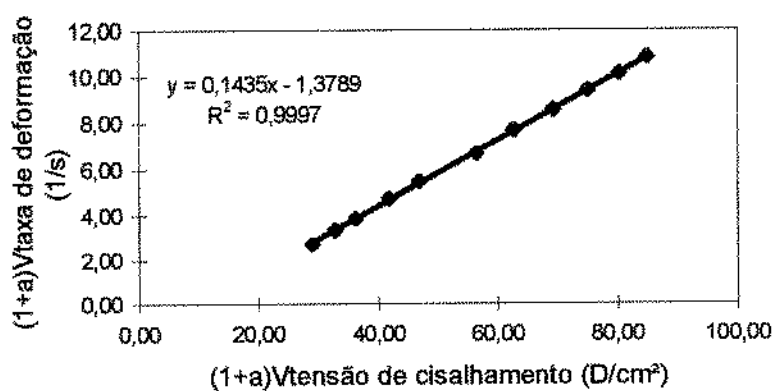
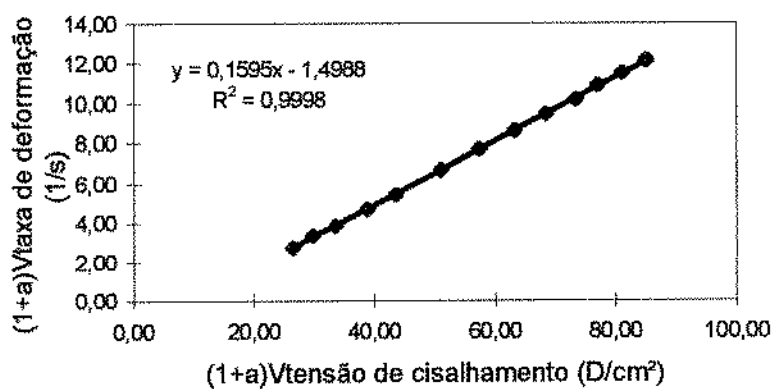
**Tabela 20.** Equações de regressão linear de Casson obtidas da medida da viscosidade de todas as amostras torradas em amêndoas tanto no microondas quanto no forno elétrico, (por triplicata).

<i>Amostra</i>	<b>Regressão Linear</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b>viscosidade plástica (P)</b>	<b>limite de escoamento (D/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>Torração Convencional (tempo em min.)</i>				
Amêndoas 40	$y = 0,1237x - 1,4033$	0,9999	65,3523	0,4923
	$y = 0,1243x - 1,4402$	1,0000	64,7229	0,5185
	$y = 0,1297x - 1,4449$	0,9999	59,4456	0,5219
<b>valor médio</b>			<b>63,1736</b>	<b>0,5109</b>
Amêndoas 42	$y = 0,1435x - 1,5248$	0,9998	48,5620	0,5813
	$y = 0,1409x - 1,4435$	1,0000	50,3707	0,5209
	$y = 0,1450x - 1,5647$	0,9999	47,5624	0,6121
<b>valor médio</b>			<b>48,8317</b>	<b>0,5714</b>
Amêndoas 44	$y = 0,1769x - 1,8851$	0,9995	31,9554	0,8884
	$y = 0,1626x - 1,8918$	0,9993	37,8233	0,8947
	$y = 0,1615x - 1,8918$	0,9991	38,3403	0,8947
<b>valor médio</b>			<b>36,0397</b>	<b>0,8926</b>
<i>Torração por Microondas (potência em W)</i>				
Amêndoas 2800	$y = 0,1798x - 2,1656$	0,9967	30,9329	1,1725
	$y = 0,1856x - 1,7853$	0,9999	29,0298	0,7968
	$y = 0,1743x - 1,6176$	0,9997	32,9159	0,6542
<b>valor médio</b>			<b>30,9595</b>	<b>0,8745</b>
Amêndoas 3000	$y = 0,1945x - 1,7553$	0,9993	26,4339	0,7703
	$y = 0,1760x - 1,3107$	0,9996	32,2831	0,4295
	$y = 0,2158x - 2,2329$	0,9996	21,4732	1,2465
<b>valor médio</b>			<b>26,7301</b>	<b>0,8154</b>
Amêndoas 3200	$y = 0,2221x - 2,0570$	0,9996	20,2723	1,0578
	$y = 0,2227x - 1,9931$	0,9997	20,1632	0,9931
	$y = 0,2249x - 1,9665$	0,9995	19,7707	0,9668
<b>valor médio</b>			<b>20,0687</b>	<b>1,0059</b>

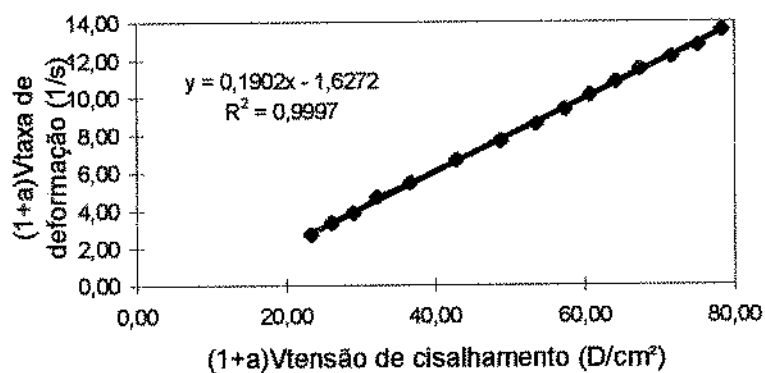
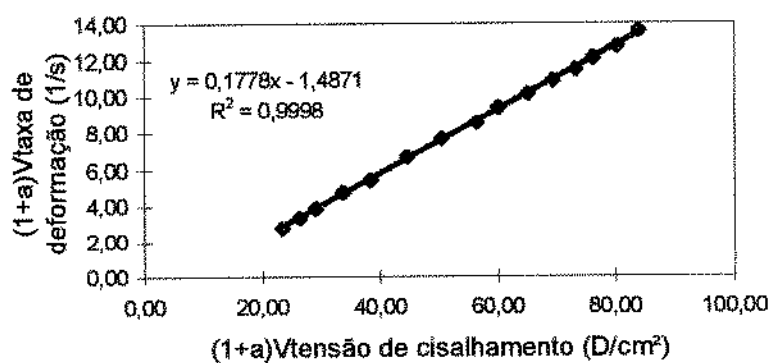
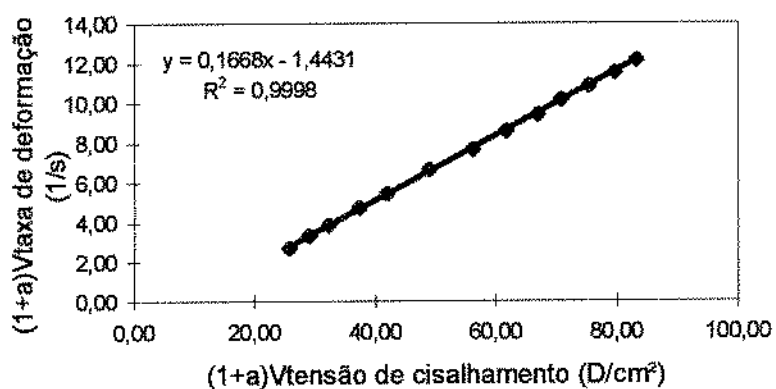
**Figura 9** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de “nibs” em torrador elétrico por 34 min.



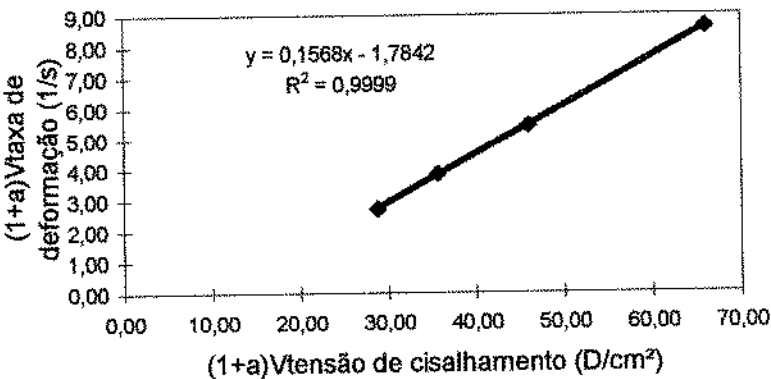
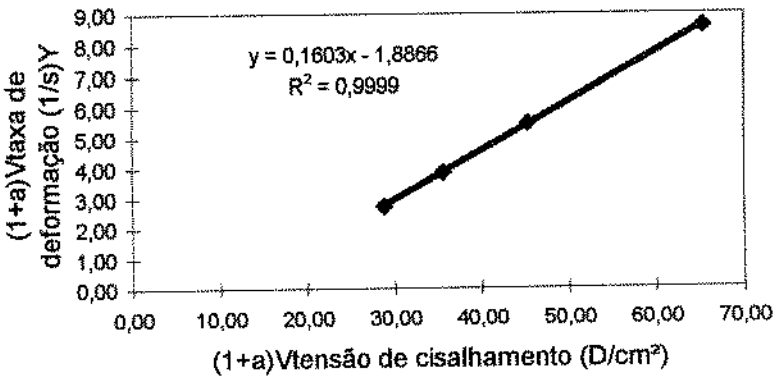
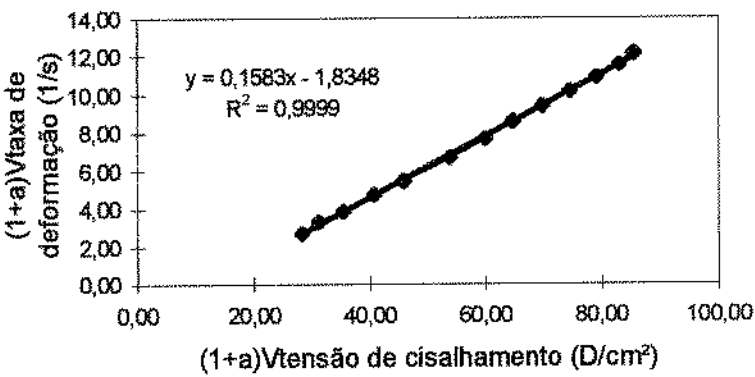
**Figura 10** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de “nibs” em torrador elétrico por 36 min.



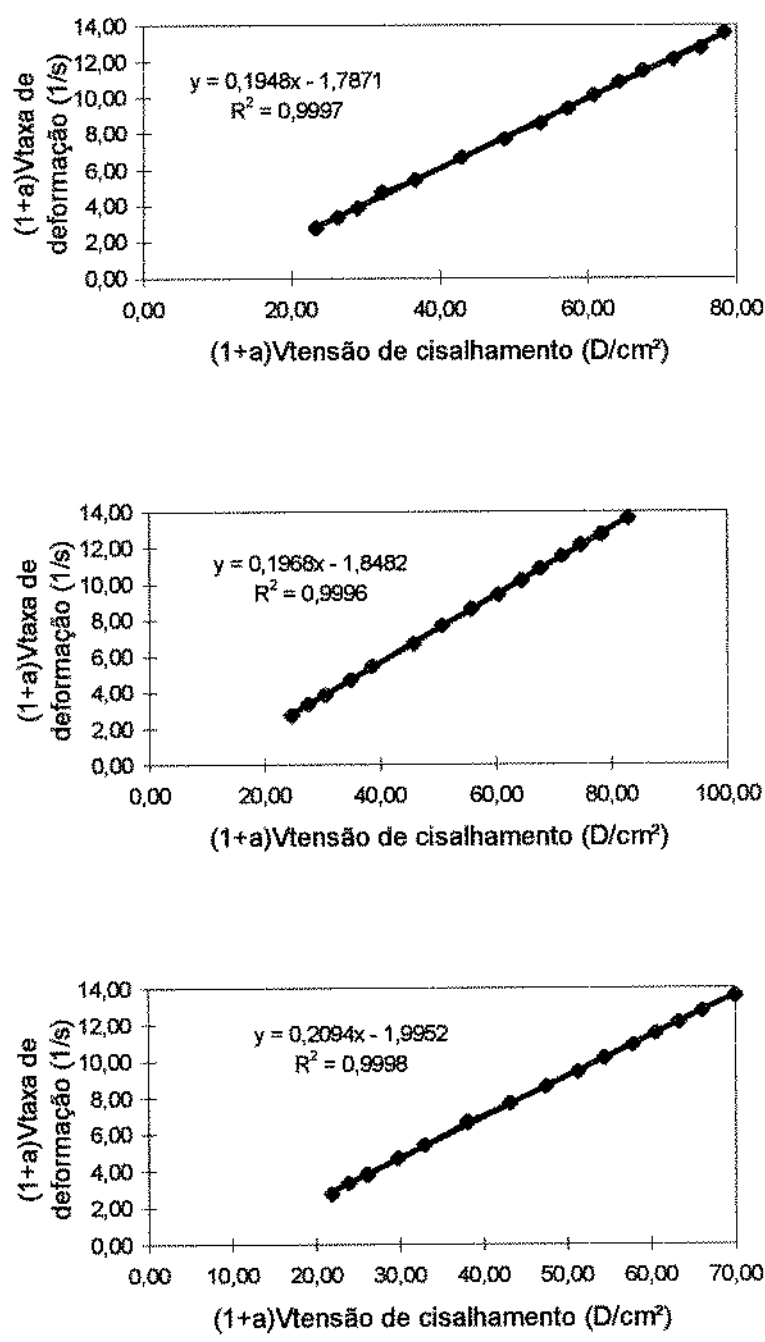
**Figura 11** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de “nibs” em torrador elétrico por 38 min.



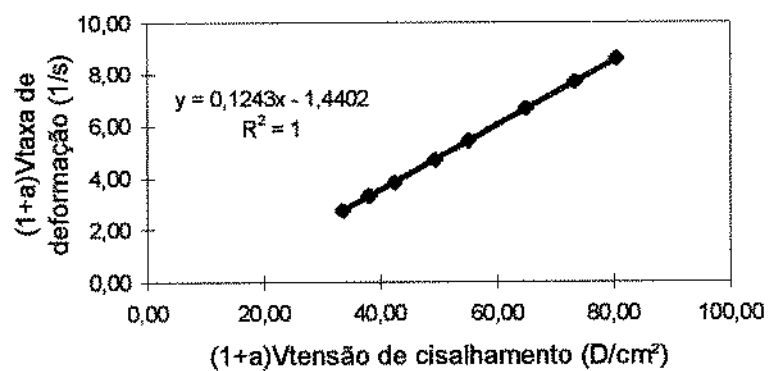
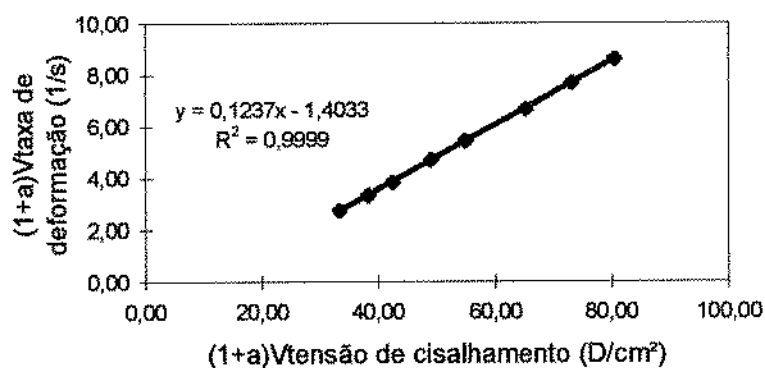
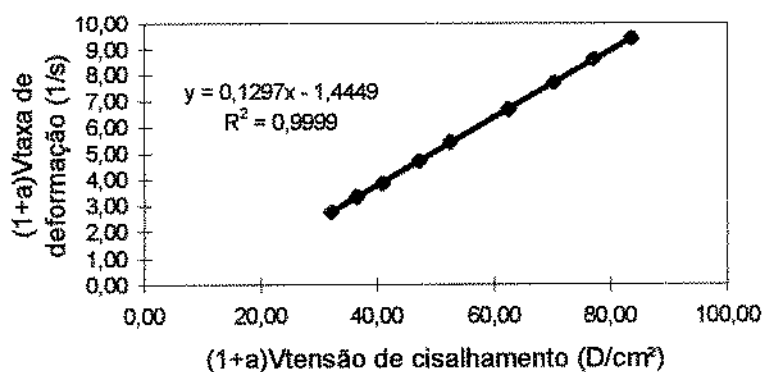
**Figura 12 :** Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de “nibs” em forno de microondas com potência de 2600 W.



**Figura 14 :** Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de “nibs” em forno de microondas com potência de 3000 W.

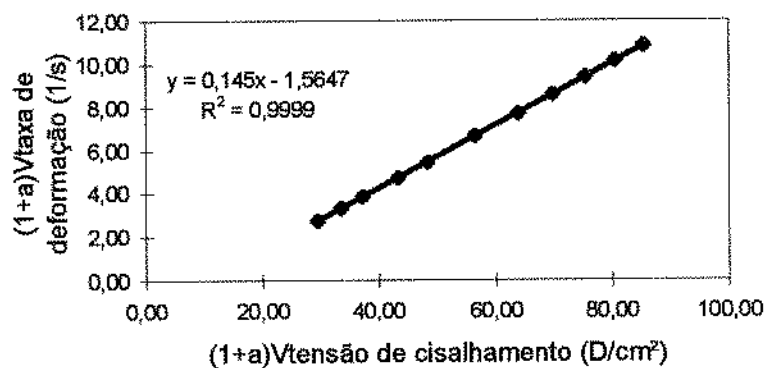
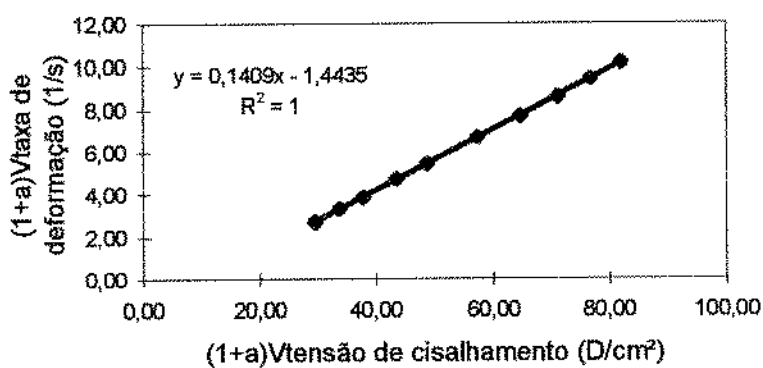
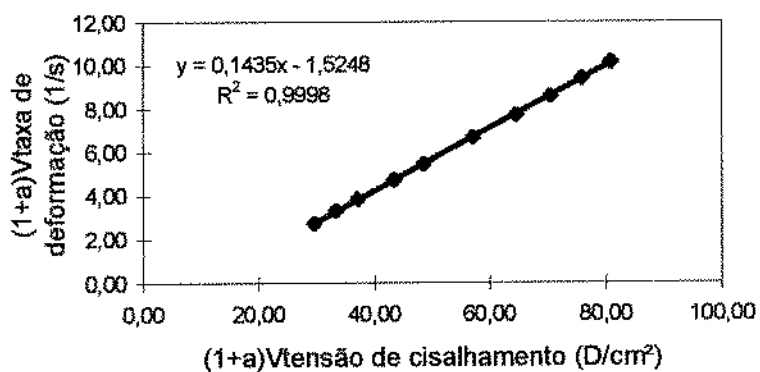


**Figura 15** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de "líquor" proveniente da torração de amêndoas inteiras em torrador elétrico por 40 min.

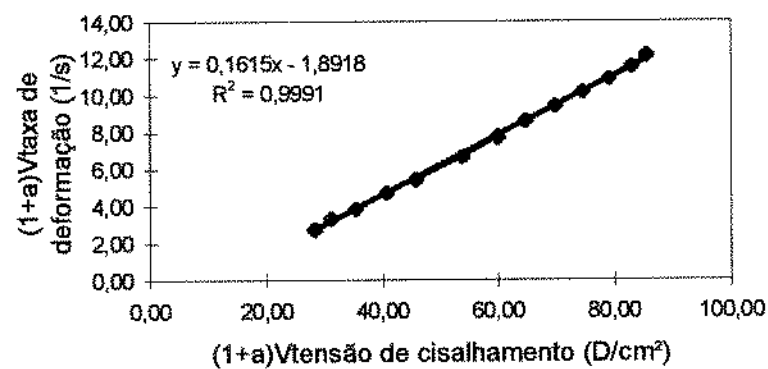
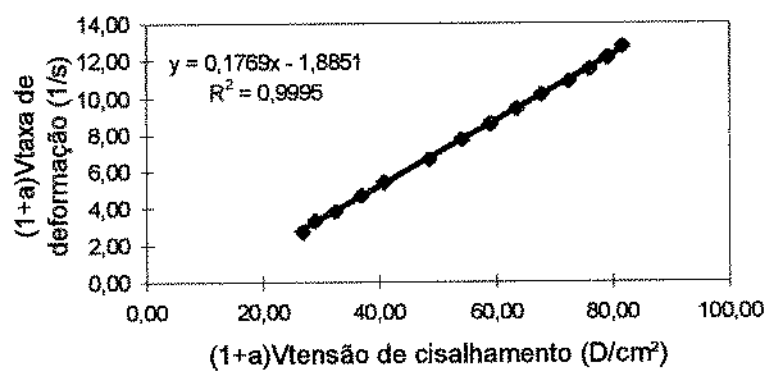
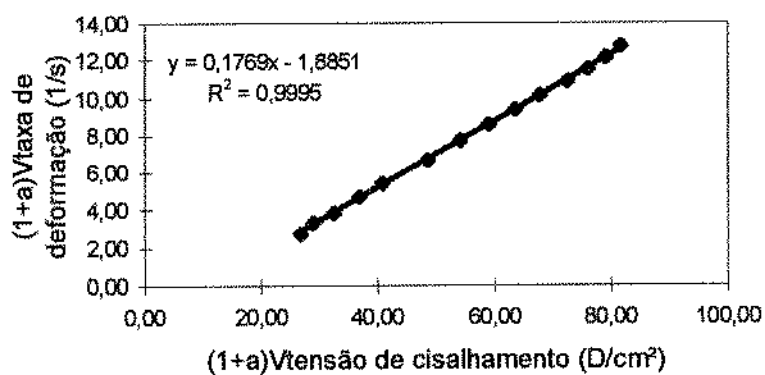




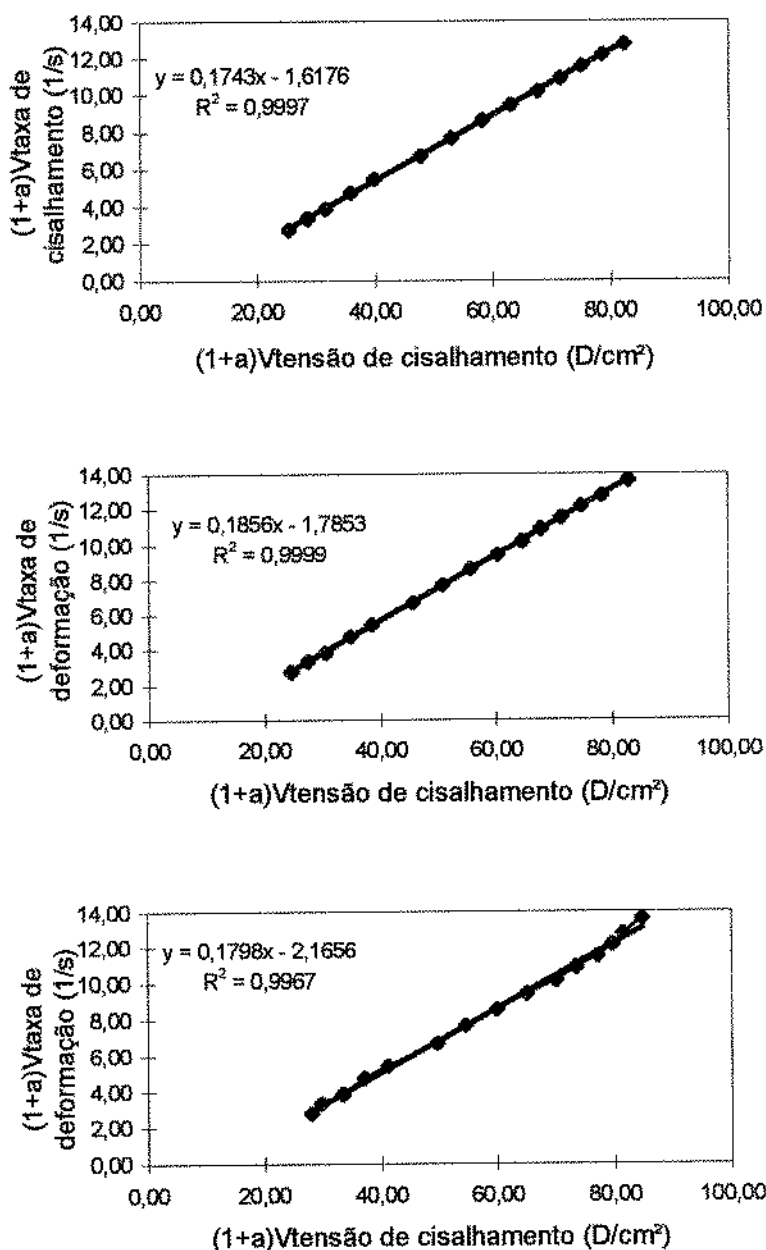
**Figura 16 :** Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em torrador elétrico por 42 min.



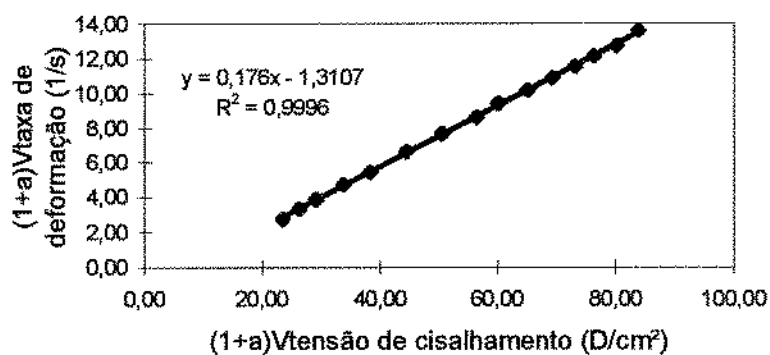
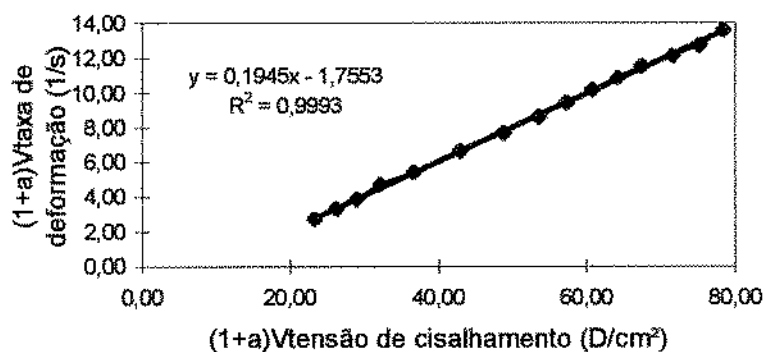
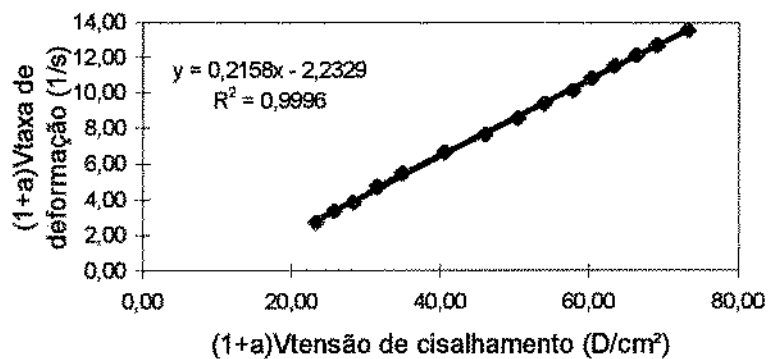
**Figura 17 :** Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em torrador elétrico por 44 min.



**Figura 18** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em em forno de microondas com potência de 2800 W.



**Figura 19** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em forno de microondas com potência de 3000 W.



**Figura 20** : Representação gráfica do modelo de Casson para as três amostras de “líquor” proveniente da torração de amêndoas inteiras em forno de microondas com potência de 3200 W.

