



UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

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

**ESTUDO DE UM PROTÓTIPO PARA A SECAGEM CONTÍNUA DE
MACARRÃO CURTO MEDIANTE AR QUENTE E MICROONDAS.**

Michele Nehemy Berteli
Engenheira de Alimentos

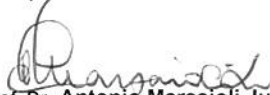
Orientador: Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr.

PARECER

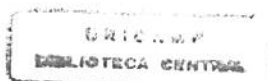
Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Michele Nehemy Berteli, aprovada pela Comissão Julgadora em 03 de maio de 2001.

Dissertação apresentada à faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de mestre em Engenharia de Alimentos.

Campinas, 03 de maio de 2001


Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior
Presidente da Banca

Campinas – 2001

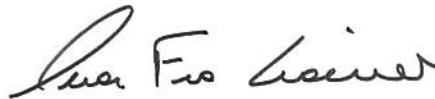


BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr. (Orientador)
DEA/FEA/UNICAMP

Profª. Dra. Florência Menegalli (Membro – Titular)
DEA/FEA/UNICAMP



Prof. Dr. César Francisco Ciacco (Membro – Titular)
DTA/FEA/UNICAMP

Profª. Dra. Míriam Dupas Hübinger (Membro – Suplente)
DEA/FEA/UNICAMP

Aos meus pais, Édison e Dilu, e
meus irmãos, Daniela e David,
pelo apoio e amor sempre
encontrados neles.

À tia Elza e os primos Bete e Benedito, obrigada pela amizade, confiança e todo carinho de vocês, principalmente quando cheguei em Campinas.

As minhas avós, tios e primos e também, é claro, aos meus “falsos primos” de São José.

À Helen, Keli, Denise e Gláucia, por toda cumplicidade, amizade, carinho. É muito bom compartilhar a vida com vocês!

À todos meus colegas de mestrado, em especial aos queridos amigos Ânoar, Junko, Elisa, Julian, Rodenei e Christiane.

Ao Raniere (Ranibaby) e Roberta (Beta) pelos momentos de descontração e amizade.

À Kelly pelo tempo que convivemos juntas.

Aos colegas do Laboratório de Microondas Aplicada: Carlos, Fábio, Flávio, Wander e Seu Aparecido.

Aos Professores da Fundação Educacional de Barretos: Luiza e Romildo, por acreditarem e incentivarem meus sonhos.

À todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
Capítulo 2 – OBJETIVO	3
Capítulo 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 – Secagem	4
3.2 – Tecnologia do Processamento de Massas Alimentícias	5
3.2.1 – Diagrama de fluxo da produção de massas alimentícias	6
3.2.2 – Descrição do diagrama de fluxo	6
3.3 – O Aquecimento por Microondas	9
3.3.1 – Propriedades Dielétricas dos Materiais	11
3.3.2 – Principais Aplicações do Processamento por Microondas	16
3.3.3 – Secagem de Massas Alimentícias com Microondas	16
Capítulo 4 – MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 – Matéria – Prima	20
4.2 – Equipamentos	21
4.2.1 – Forno de Microondas Adaptado	21
4.2.2 – Secador Rotativo a Ar Quente Assistido a Microondas	23
4.3 – Metodologia	27
4.3.1 – Umidade	27

4.3.1.1 – Determinação da Umidade Inicial	27
4.3.1.2 – Determinação da Umidade Final	27
4.3.2 – Planejamento Experimental dos Ensaio Realizados no Forno Doméstico	
Adaptado	28
4.3.3 – Ensaio de Secagem Realizados no Forno de Microondas Doméstico Adaptado	30
4.3.4 – Ensaio de Secagem Realizados no Secador Contínuo a Ar quente Assistido a	
Microondas	32
Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 – Determinação da Potência Disponível de Microondas no Forno Doméstico	34
5.2 – Resultados Obtidos de Secagem Assistida a Microondas Realizados no Forno de	
Microondas Doméstico Adaptado	35
5.2.1 – Resultados Obtidos nos Ensaio Realizados com o Macarrão Tipo <i>Penne</i> de	
Trigo Mole	35
5.2.1.1 – Análise do Planejamento Experimental dos Ensaio com <i>Penne</i> Trigo	
Mole	39
5.2.2 – Resultados Obtidos nos Ensaio com o Macarrão Tipo <i>Penne</i> de Trigo Durum	43
5.2.2.2 – Análise do Planejamento Experimental dos Ensaio com <i>Penne</i> Trigo	
Durum	48
5.2.3 – Resultados Obtidos nos Ensaio Realizados com o Macarrão Tipo <i>Penne</i>	
de Trigo Durum Enriquecido com Vegetal – Espinafre	51
5.2.3.2 – Análise do Planejamento Experimental dos Ensaio com <i>Penne</i> Trigo	
Durum Enriquecido com Vegetal - Espinafre	56
5.2.4 – Discussão Geral dos Ensaio de Secagens Assistida a Microondas no Forno	
Doméstico Adaptado	59

5.3 – Resultados obtidos nos Ensaios de Secagem Assistida a Microondas Realizados no Secador Piloto	60
5.4 – Aspectos Econômicos da Ampliação de Escala	62
Capítulo 6 – CONCLUSÕES	68
Capítulo 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
Capítulo 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
Apêndice A	75
Apêndice B	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Comprimento de onda	10
Figura 2 – Curva de umidade para produto de massa longa	17
Figura 3 – Curva típica de taxa de secagem com aplicação de microondas	18
Figura 4 – Forno de microondas doméstico adaptado a um sistema gerador de ar quente	22
Figura 5 – Forno de microondas doméstico adaptado	22
Figura 6 – Desenho esquemático do secador de microondas	24
Figura 7 – Secador rotativo contínuo a ar quente assistido a microondas	26
Figura 8 – Adaptação de um alimentador do tipo rosca sem fim com um vibratório	24
Figura 9 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo mole, seco a uma potência de 150W, vazão 1,2m ³ /min, tempo de 47 minutos	37
Figura 10 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo mole, seco a uma potência de 200W, vazão 1,0m ³ /min, tempo de 25 minutos	37
Figura 11 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo mole, seco a uma potência de 300W, vazão 1,2m ³ /min, tempo de 20 minutos	38
Figura 12 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo durum, seco a uma potência de 150W, vazão 1,2m ³ /min, tempo de 52 minutos	46
Figura 13 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo durum, seco a uma potência de 200W, vazão 1,0m ³ /min, tempo de 30 minutos	46
Figura 14 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo durm, seco a uma potência de 300W, vazão 1,2m ³ /min, tempo de 25 minutos	47
Figura 15 – Macarrão tipo <i>Penne</i> – trigo durum enriquecido com vegetal, seco a uma potência de 150W, vazão 1,2m ³ /min, tempo de 52 minutos	54

- Figura 16 – Macarrão tipo *Penne* – trigo durum enriquecido com vegetal, seco a uma potência de 200W, vazão $1,0\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 30 minutos 54
- Figura 17 – Macarrão tipo *Penne* – trigo durum enriquecido com vegetal, seco a uma potência de 300W, vazão $1,2\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 25 minutos 55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo do planejamento experimental	28
Tabela 2 – Potência calculada disponível no forno de microondas doméstico	34
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de secagem realizados com <i>Penne</i> trigo mole	35
Tabela 4 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado	36
Tabela 5 – Classificação de trincas no produto final	36
Tabela 6 – Porcentagem de macarrão de trigo mole sem trincas após os testes de secagem	39
Tabela 7 – Níveis da variável potência utilizados no planejamento experimental	39
Tabela 8 – Níveis da variável vazão utilizados no planejamento experimental	40
Tabela 9 – Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão <i>Penne</i> trigo mole sem equalização	40
Tabela 10 – Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão o macarrão <i>Penne</i> trigo mole com equalização	42
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de secagem realizados com <i>Penne</i> trigo durum	43
Tabela 12 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado	44
Tabela 13 – Novos resultados dos ensaios de secagem realizados com <i>Penne</i> trigo durum	44
Tabela 14 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado	45
Tabela 15 – Classificação de trincas no trincas no produto final – <i>Penne</i> trigo durum	45
Tabela 16 – Porcentagem de macarrão de trigo durum sem trincas após os teste de secagens	48
Tabela 17 – Níveis da variável potência utilizados no planejamento experimental	48
Tabela 18 – Níveis da variável vazão utilizados no planejamento experimental	49
Tabela 19 – Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão <i>Penne</i> trigo durum sem equalização	49

Tabela 20 – Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o <i>Penne</i> trigo durum com equalização	50
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de secagem realizados com <i>Penne</i> trigo durum	51
Tabela 22 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado	52
Tabela 23 – Novos resultados dos ensaios de secagem realizados com <i>Penne</i> trigo durum com vegetal	52
Tabela 24 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado	53
Tabela 25 – Classificação de trincas no produto final – <i>Penne</i> trigo durum enriquecido com vegetal	53
Tabela 26 – Porcentagem de macarrão de trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre Sem trincas após os testes de secagens	56
Tabela 27 – Níveis da variável potência utilizados no planejamento experimental	56
Tabela 28 – Níveis da variável vazão utilizados no planejamento experimental	57
Tabela 29 – Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão <i>Penne</i> trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre sem equalização	57
Tabela 30 – Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão <i>Penne</i> trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre com equalização	58
Tabela 31 – Resultados apresentados nos ensaios realizados no secador piloto	61

RESUMO

A secagem é uma das mais importantes etapas da produção industrial de massas alimentícias, quer do ponto de vista da qualidade do produto final, quer sob o aspecto econômico da sua obtenção. Embora as aplicações industriais das microondas, em especial na indústria alimentícia, não tenham tido o mesmo desenvolvimento das aplicações residenciais, uma das operações industriais mais bem sucedidas, tem sido a secagem de massas alimentícias assistida a microondas.

Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da secagem de massa curta, com umidade no intervalo entre 23 até 12% b.u., em um forno doméstico de microondas, equipado com dupla emissão de onda, com potência regulável e 950W de potência nominal máxima, 2,45GHz de frequência e adaptado com um sistema de provisionamento de ar quente com temperatura controlada. Na sequência dos experimentos, foi usado um secador piloto rotativo contínuo a ar quente assistido a microondas, de frequência 2,45GHz, dotado de ajuste de potência infinitamente variável entre 0 e 100% de 6kW.

A matéria – prima utilizada foi a massa curta do tipo *Penne*, de três formulações: trigo mole, trigo durum e trigo durum enriquecida com vegetal – espinafre. Os experimentos foram desenvolvidos em três diferentes vazões de ar e densidades de potência no forno doméstico. No final de cada ciclo metade da massa foi resfriada a temperatura ambiente e a outra metade em um dessecador, também a temperatura ambiente, com o ar a uma umidade relativa de 75%.

O tempo da secagem assistida a microondas, quando comparado ao do processo convencional, apresentou uma redução de 13 vezes, sem prejudicar a aparência do produto final.

ABSTRACT

Drying is one of the most important unit operations of the industrial production of pasta, both from the final product quality viewpoint or from the economical aspects of its manufacture. Even though the industrial applications of microwaves, mainly in the food industry, have not had the same development as the microwave domestic applications, one of the most well succeeded industrial operations was the microwave assisted drying of pasta.

This study aimed to evaluate the efficiency of drying short cut pasta, ranging from 23 to 12 % w. b. moisture content, by using a microwave domestic oven, equipped with double wave emission adjustable power and 950 Watts of maximum power, 2,4 GHz frequency and adapted with a controlled heated air admission system. Proceeding the experiments, it was used a continuous pilot heated air rotating, microwave assisted 2,45 GHz frequency, with power adjustable from 0 to 100% (6kW).

The raw material employed was the *Penne* type short cut pasta, of three main formulations: normal durum, durum wheat and durum wheat with vegetable – spinach. Experiments were planned to test three different power densities and air flows, at the entrance of the oven. At the end of each drying cycle, half the dried pasta was cooled under room temperature, the other half was submitted to an equalization process into a desiccator, where the air inside of it was kept to a 75% relative moisture and room temperature.

The microwave assisted drying time, as compared to the conventional process, showed a 13 time reduction, without prejudice of the final product appearance.

1- INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Embora as aplicações industriais das microondas, em especial na indústria alimentícia, não tenham tido o mesmo desenvolvimento das aplicações residenciais (SCHIFFMANN, 1992), uma das operações industriais mais bem sucedidas, notadamente nos E.U.A., tem sido a secagem de massas alimentícias assistida a microondas. As diversas vantagens trazidas pelas microondas vieram à tona primeiramente através do trabalho conjunto de um fabricante de massas canadense (Lipton) e de um fabricante americano de equipamentos (Cryodry), envolvidos em uma empreitada de adaptar um estágio de microondas a um secador de processo originalmente só convencional. Esta experiência vem relatada na publicação de MAURER, TREMBLEY e CHADWICK (1971), onde estão enumerados alguns fatores a serem levados em conta ao se considerar a economia de um processamento por microondas quando comparada à de um mais convencional, como por exemplo: - *vantagens para o produto* - traduzidas pelo tempo de re-hidratação ou cozimento do macarrão reduzido à metade; - *vantagens aplicadas ao processo* – tempo de produção, conseqüentemente espaço ocupado, reduzidos em 90%, embora a capacidade final tivesse sido duplicada; - *temperaturas maiores admitidas pelo processo* – permitindo efeito pasteurizador mais pronunciado sobre o produto final; *custos operacionais* – sensivelmente reduzidos (26% menor) em relação à secagem convencional.

Segundo dados fornecidos pela ABIMA – Associação Brasileira das Indústrias de Massas Alimentícias, o consumo anual per capita de macarrão na Itália é de 28,2kg, nos Estados Unidos, 9,0kg, enquanto no Brasil é de 5,8kg.

Uma pesquisa do IBGE (Folha de São Paulo, 1997) revela que o macarrão no Brasil está entre

as trinta maiores despesas alimentares do país – apresentando um consumo médio de 1,96kg/família/mês. Isto é devido ao seu baixo custo, sua conveniência do ponto de vista de facilidade no preparo e sua ampla vida de prateleira.

Mas, apesar destes fatores, o consumo per capita desta massa ainda é baixo no Brasil, quando comparado a outros países, conforme foi citado acima.

Dados de 1992 para os Estados Unidos revelam a existência de cerca de duzentos e sessenta sistemas industriais com aplicação de microondas no processamento de alimentos sendo que, destes, mais de duzentos destinavam-se ao descongelamento de carnes e de dez a vinte aplicações eram empregadas na secagem de massa alimentícia (SCHIFFMANN, 1992).

No Brasil, o trabalho pioneiro de processamento foi conduzido pelo IMT – Instituto Mauá de Tecnologia, em conjunto com a empresa Braibanti, com a aplicação de microondas na secagem de macarrão. Porém, este trabalho, por devidas razões foi interrompido, não apresentando continuidade em nenhuma aplicação industrial ainda no Brasil.

2- OBJETIVO

Este projeto teve como objetivo avaliar a eficiência da secagem de massa curta, com umidade no intervalo entre 23 até 12%, através de um secador rotativo contínuo a ar quente assistido a microondas. Busca-se redução do tempo de secagem, melhoria da qualidade da massa alimentícia, maior produção industrial e menor custo, quando comparado aos processos convencionais.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Secagem

A secagem é um processo que engloba os fenômenos de migração e evaporação de umidade. Inicialmente, uma pequena quantidade de umidade é retirada através de calor latente de evaporação, por uma fonte de calor, resultando em uma evaporação de água da superfície do material. A força impulsora da secagem é devida: *a transferência de calor*, gerada pelo gradiente de temperatura entre a superfície do material e o ar ambiente, durante a transferência de massa; e *a difusão de umidade*, que ocorre por um gradiente de concentração entre o interior do alimento e a superfície (AL-DURI & MC INTYRE, 1992).

Segundo WALLACE & VAN ARSDEL (1964), os alimentos são secos ou desidratados para atender a vários propósitos: preservação contra deterioração; conservação de suas condições durante estocagem; diminuição dos custos e dificuldade de acondicionamento, manipulação, armazenamento e transporte do material. Vários fatores determinam a taxa de evaporação de água de um alimento, sendo eles: a temperatura do sólido; a temperatura, umidade, pressão e velocidade do ar; a composição e estrutura do alimento.

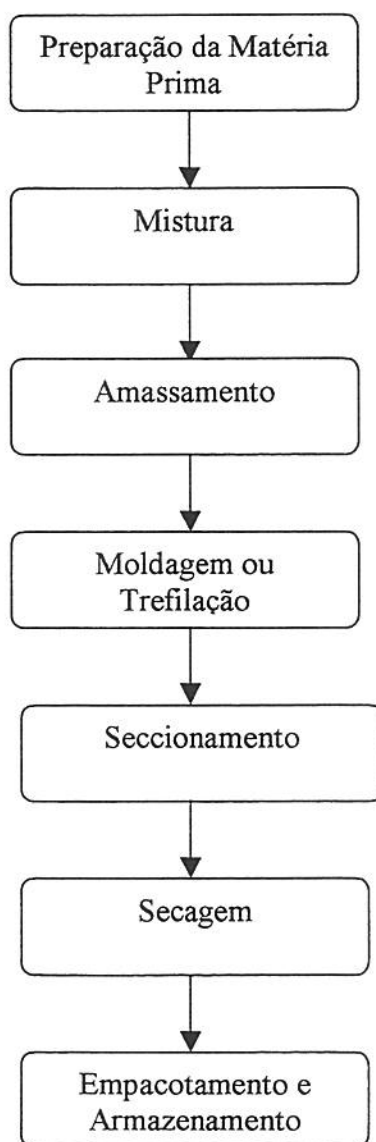
MILATOVIC & MONDELLI (1991) relatam que os processos de secagem têm evoluído consideravelmente ao longo dos anos, buscando as melhores condições de secagem, ou seja, a temperatura e umidade do ar que resultem em um menor tempo de processamento com o máximo de qualidade do produto final.

3.2- Tecnologia do Processamento de Massas Alimentícias

De acordo com o decreto 12.486/78, publicado no Diário Oficial do Estado de São Paulo, em 21 de outubro de 1978, massas alimentícias são definidas como sendo um produto não fermentado, obtido pelo amassamento da farinha de trigo, da semolina e da sêmola do trigo com água, adicionado ou não de outras substâncias permitidas. As massas serão designadas por nomes próprios, de acordo com sua forma, tipo e substâncias adicionadas - espaguete, alfabeto, massa com ovos, massa com espinafre. Quando preparadas pela mistura de farinha de trigo com outras farinhas, serão consideradas massas alimentícias mistas. O padrão de identidade e qualidade das massas alimentícias classifica a massa fresca como tendo no máximo 30% de umidade em base úmida e a massa seca 13% respectivamente. Pelo seu formato, a massa pode ser longa, como espaguete e talharim; curta ou cortada, como ave-maria e parafuso; ou massinha, como alfabeto e estrelinhas.

Segundo CIACCO & CHANG (1982), a produção de massas alimentícias inclui as seguintes etapas:

3.2.1- Diagrama de fluxo da produção de massas alimentícias (Fonte CIACCO & CHANG, 1982)



3.2.2- Descrição do diagrama de fluxo segundo CIACCO & CHANG (1982)

- *preparação da matéria-prima*: inclui a recepção da farinha, sua análise de qualidade,

remoção de materiais estranhos e transporte até o dispositivo dosificador;

- *mistura*: durante a mistura, os materiais secos (farinha, aditivos) e os líquidos (água, ovos, etc.) são dosados em proporções determinadas e, a seguir, misturados de modo a obter uma mistura homogênea;
- *amassamento*: é realizado em um extrusor, onde a massa é conduzida e amassada pela ação de uma rosca sem fim;
- *moldagem ou trefilação*: a moldagem das massas alimentícias é uma das etapas mais importantes para a obtenção de um produto de boa qualidade. Nesta etapa, o aspecto exterior é desenvolvido e o produto adquire uma forma que se conserva até o fim do processamento, sem que ocorram deformações ou rachaduras;
- *seccionamento*: o corte das massas alimentícias é uma operação independente da moldagem. Esta operação é realizada conforme as massas moldadas saem da trefila e antes da secagem, conferindo às massas uma forma mais adequada para o processo de secagem posterior. Nesta etapa são compreendidas as seguintes operações – ventilação, corte e distribuição das massas. A ventilação é feita imediatamente após a saída da trefila proporcionando um produto fácil para o corte da massa extrudada. O corte da massa é realizado de acordo com seu formato;
- *secagem*: o teor de umidade da massa emergindo da trefila é de 29 a 31%. O objetivo da secagem de massas alimentícias é reduzir a umidade para cerca de 12,5%, tornando o produto mais estável durante o armazenamento, sendo uma etapa da fabricação considerada crucial tanto do ponto de vista da qualidade, quanto do econômico.
- *empacotamento e armazenamento da massa alimentícia*.

O desvio do regime de condições ótimas no processo de secagem pode prejudicar o resultado

da operação; a secagem muito rápida pode provocar tensões no produto, causando fissuras, rupturas e outros defeitos físicos que comprometem sua qualidade. Por outro lado, a secagem lenta pode causar a aceleração dos processos microbiológicos e bioquímicos que podem não só elevar a acidez do produto, como também danificá-lo por completo, além de implicar em um menor rendimento no produto acabado. Durante a secagem, a temperatura, umidade relativa e a velocidade do ar devem ser cuidadosamente controladas, proporcionando assim uma secagem rápida sem que a qualidade seja comprometida.

Segundo LIRICI (1990) a massa alimentícia, seja curta ou longa, antes de entrar propriamente no secador, é transportada por uma esteira conhecida como “trabatto” e nesta, submetida a uma intensa ventilação com ar quente por alguns minutos, com o objetivo de remover o excesso de umidade superficial que possa vir a provocar formação de grumos de produto na esteira. Nesta etapa a massa alimentícia atinge uma umidade em torno de 23%.

CIACCO & CHANG (1982), considerando as transformações que ocorrem no produto, sugerem que a etapa da secagem pode ser dividida em três sub-etapas distintas:

- pré-secagem: a massa moldada é colocada em contato com ar quente com umidade relativa em torno de 65% e com temperatura que varia de 50 a 65°C, dependendo da forma da massa. Nestas condições, o teor de umidade cai de 30% para 18-19%. As características plásticas do produto ($\geq 20\%$ de umidade) propiciam uma secagem rápida (2-3 horas) que minimiza o desenvolvimento de microrganismos e uma atividade enzimática indesejável, além de estabilizar a rede do glúten, tornando a estrutura da massa rígida, possibilitando o manuseio e inibindo o escurecimento enzimático na superfície, com redução do tempo de secagem. Faz parte dessa sub-etapa a perda de

umidade ocasionada no trabatto;

- repouso: no início da pré-secagem, a umidade migra da camada interior da massa, através de canais capilares, na mesma velocidade que evapora da superfície. Após determinado período, a migração interna diminui e a umidade concentra-se no interior do produto. Inicialmente, este gradiente não é muito grande e as tensões desenvolvidas devido à plasticidade do produto são absorvidas. À medida que a umidade vai diminuindo, as tensões vão aumentando e a camada externa da massa, endurecida, perde a plasticidade e pode trincar. Assim, a partir de 18-19% de umidade, é necessário deixar a massa em repouso por um período de uma hora aproximadamente, onde a circulação de ar será desligada e a umidade relativa é mantida em torno de 95-100% . Nestas condições não ocorre evaporação de água e o gradiente de umidade entre o interior e o exterior é minimizado;

- secagem final: neste estágio, a umidade diminui de 18-19% para 13-12,5%. Durante a secagem final é necessário manter o gradiente de umidade entre o interior e o exterior menor que 1%, sendo então esta a mais prolongada de toda operação de secagem. As condições de secagem variam para os diferentes tipos de massas alimentícias.

A falta de uniformidade do tratamento está relacionada ao defeito mais comum associado à secagem - o caneamento - que é o aparecimento de trincas ou estrias na massa seca (LIRICI, 1990).

3.3- O Aquecimento por Microondas

Microonda ou energia de microondas é uma modalidade de radiação eletromagnética como a luz ultravioleta, raios-X, ondas de televisão, rádio AM e FM e infravermelho. A fim de se evitar

interferências nas faixas de frequência utilizadas em telecomunicações, são reservadas para as aplicações em eletrotermia algumas faixas estreitas de frequência, entre as quais as mais empregadas em microondas são $915 \pm 25 \text{ MHz}$ e $2450 \pm 50 \text{ MHz}$ (SENISE, 1985).

De acordo com SMIT (1987), as ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos associados, que se propagam pelo espaço. Denominam-se: - comprimento de onda, a distância de um ponto de uma onda ao ponto correspondente da onda seguinte, por exemplo, de máximo positivo a máximo positivo; - frequência de emissão, o número de ondas ou ciclos por segundo.

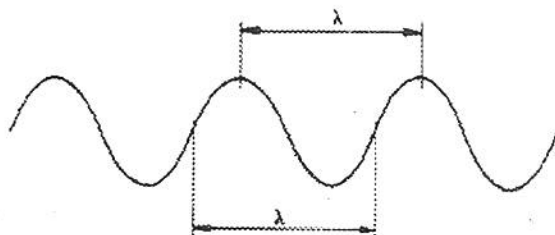


Figura 1- Comprimento de onda (SMIT, J. 1987)

As microondas são geradas pelo "magnetron", um tubo oscilador alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter energia elétrica de frequência industrial (60Hz) em energia eletromagnética de microondas (por exemplo, 2450MHz). O campo eletromagnético se propaga na forma de onda eletromagnética (o meio de transporte da energia) no interior de um guia de onda metálico (linha de transmissão), até ser injetada no aplicador (uma cavidade com paredes metálicas onde está o produto a aquecer). A penetração e o aquecimento de alimentos em um campo de microondas são praticamente instantâneos, em contraste com métodos convencionais de

aquecimento, onde o transporte de calor da superfície para o centro se dá 10 a 20 vezes mais lentamente.

A energia de microondas é uma fonte ímpar de energia porque ela cria calor dentro dos materiais processados. Esta propriedade resulta em tempos de processamento mais curtos, maior rendimento do produto final e usualmente em uma qualidade superior à encontrada com técnicas convencionais do processamento (DECAREAU & PETERSON, 1986).

A principal meta, atualmente, nas pesquisas sobre as propriedades elétricas dos alimentos, vem sendo determinar mecanismos de interação entre os alimentos e a energia eletromagnética nas frequências de microondas, para facilitar o desenvolvimento de processos e produtos alimentícios. Essas propriedades determinam a quantidade de energia acoplada por um produto alimentício, sua distribuição dentro do produto e, conseqüentemente, o tempo e a frequência das microondas necessários para o aquecimento dos alimentos em processos de transferência de energia por condução e radiação (MUDGETT, 1996).

3.3.1- Propriedades Dielétricas dos Materiais

Um material dielétrico pode ser definido como aquele que interage com um campo elétrico porque contém portadores de cargas que podem ser deslocados, uma vez que, como todos os materiais, consistem de um núcleo atômico positivo envolto por uma nuvem eletrônica negativa. A interação de um campo elétrico com um dielétrico tem sua origem devido às partículas carregadas com as cargas do campo aplicado. Assim, quando um campo elétrico externo é aplicado, os elétrons

são levemente deslocados com respeito ao núcleo e então momentos dipolos são induzidos, causando o que é conhecido como polarização eletrônica dos materiais (VON HIPPEL, 1966).

Segundo MUDGETT (1996), materiais biológicos agem como maus isoladores, isto é, capacitores não ideais, em termos de sua habilidade para armazenar e dissipar energia elétrica de uma aplicação de campo eletromagnético para transferência por irradiação.

SENISE (1985) relata que as radiofrequências e microondas são empregadas para o aquecimento de materiais dielétricos, ou seja, materiais que, além de maus condutores de eletricidade são, via de regra, também maus condutores térmicos.

Desde que a energia eletromagnética penetre no material dielétrico, ocorre a transformação em calor por um conjunto de mecanismos em escala molecular e atômica, entre os quais se sobressaem a condução iônica e a rotação dipolar. A esta última, sobretudo, associa-se a imagem de “histerese dielétrica”, tema que identifica o aquecimento de materiais dielétricos sob a ação de rádio-frequências e microondas.

Os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são:

- *permissividade (ou constante dielétrica) relativa ϵ'* : que mede a capacidade de um material de armazenar energia elétrica, por unidade de volume;
- *fator (ou constante) de perdas relativa ϵ''* : que é um parâmetro adimensional dado pelas

propriedades elétricas do material. Seu valor indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor;

- *tangente de perdas*: que é o quociente dos dois,

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (1)$$

Seu valor indica a capacidade do material de ser penetrado por um campo elétrico e de dissipar essa energia na forma de calor.

A grande maioria das aplicações de radiofrequência e microondas na indústria relaciona-se com a água. A água, no estado líquido, está incluída entre os dielétricos com valores mais elevados de ε' e $\tan \delta$, o que permite dizer que materiais com água são “fáceis de esquentar” por microondas ou radiofrequência.

As propriedades dielétricas dos materiais variam com a temperatura, sendo muito importantes nas aplicações de rádio-frequência e microondas no processo de aquecimento dielétrico. Entretanto, as características de aquecimento dos alimentos por microondas estão relacionadas não somente com as suas propriedades dielétricas, como também às propriedades de transmissão peculiares aos processos de aquecimento dielétrico e às propriedades térmicas e de transporte que afetam as transferências de calor e massa em ambos os processos de aquecimento, convencional e dielétrico. O aquecimento de alimentos por microondas resulta do acoplamento de energia elétrica de um campo eletromagnético em uma cavidade de microondas e de sua dissipação dentro do produto. Isto resulta em elevação de temperatura instantânea dentro do produto, em contraste com os processos de

aquecimento convencionais que transferem energia da superfície, com constantes de tempo térmicas longas e lenta penetração de calor. A absorção volumétrica de potência (P_V) e a elevação de temperatura no aquecimento por microondas são geralmente descritas pelas equações (GOLDBLITH, 1967) :

$$P_V = 2 \pi f \varepsilon_0 E^2 \varepsilon'' = 55,6325 \times 10^{-12} \times f \times E^2 \times \varepsilon'' \quad (2)$$

$$dT/d\theta = P_V / \rho c_p \quad (3)$$

onde P_V = potência por unidade de volume (W/m^3);

f = frequência (Hz);

ε_0 = permissividade dielétrica do vácuo (ou ar) = $8,84 \times 10^{-12}$ (F/m);

ε'' = fator de perda dielétrica relativa

E = valor eficaz do vetor intensidade de campo elétrico (V/m)

ρ = densidade (kg/m^3)

c_p = calor específico (J/kg.K)

T = temperatura (K)

θ = tempo (s)

Enquanto essas equações descrevem com precisão os efeitos do aquecimento volumétrico, elas são difíceis de aplicar na análise dos processos dos alimentos por microondas por diversas razões:

- Primeiro, a absorção de potência e intensidade de campo dentro dos produtos alimentares variam com a profundidade a partir da superfície sob condições que estão continuamente variando com a temperatura durante o curso da irradiação. Em concordância com isto, o fator de perda dielétrica ϵ'' varia não somente de uma região do produto para outra, mas também dentro de um particular segmento do produto conforme a temperatura sobe pelo aquecimento mediante as microondas.
- Segundo, o gradiente de voltagem dentro do produto não pode ser determinado “a priori” e também varia como uma função da profundidade a partir da superfície.
- Finalmente, o calor gerado dentro do produto pelo acoplamento da energia elétrica do campo está sujeito aos mecanismos convencionais de transferência de calor por condução interna, convecção superficial e evaporação de umidade, mediadas pelas propriedades térmicas e de transporte do produto. Essas propriedades físicas também dependem da temperatura, embora em menor grau do que as propriedades elétricas do produto, e assim variam com o tempo durante o período de aquecimento. Desta forma, o uso prático das equações recém propostas fica limitado aos procedimentos de calibração na medição da potência dos fornos de microondas. Por exemplo, uma fórmula similar à equação 3 é usada no **Apêndice B** para determinar os níveis de potência de microondas pela medida da elevação de temperatura em cargas d'água padronizadas como meio de calibrar o equipamento de processo por microondas.

No **Apêndice A** encontram-se valores de ϵ' e $\tan \delta$ de alguns materiais, em geral (**Tabela I**), e alimentos, em particular (**Tabela II**).

3.3.2- Principais Aplicações do Processamento por Microondas

De acordo com SALE (1992), o aquecimento por microondas não possui vantagens comerciais, porém quando combinado com fontes convencionais de aquecimento, resulta em processos com grande potencial.

As aplicações tecnicamente possíveis de microondas em eletrotermia industrial são numerosas, sendo que as aplicações são (SENISE, 1985):

- *na indústria de alimentos*: secagem de massas alimentícias, desidratação a vácuo, branqueamento, esterilização, pasteurização, cozimento, descongelamento de carnes e outros alimentos;
- *na indústria do papel e gráfica*: secagem de tintas e revestimentos, secagem de cola;
- *na indústria química*: secagem de plásticos, secagem de produtos em pó, expansão de espumas, reações químicas incentivadas, eliminação de resíduos tóxicos.

3.3.3- Secagem de Massas Alimentícias com Microondas

Segundo DONNELLY (1991), uma etapa crítica no processamento de massas alimentícias é a secagem, onde a massa passa de um valor de 31% de umidade para um de aproximadamente 12%. Seguindo a evolução dos processos industriais, até 1974, a Temperatura Convencional de Secagem - (CTD) de massas era de até 55 °C, apresentando um tempo de secagem de 16 horas para massas longas e 8 horas para as massas curtas. O processo a Alta Temperatura - (HTD) foi introduzido em uma linha comercial em 1974, onde as temperaturas de secagem passaram de 55 para 75 °C, resultando em um menor tempo de secagem (10 horas para massas longas e 4,5 horas para massas

curtas), diminuição na contagem bacteriana e melhor qualidade total do produto final.

Passados alguns anos, a tecnologia de secagem de massas evoluiu, assim a temperatura do processo passou de 75 para 100 °C e maiores. Esses ciclos de secagem a Altíssimas Temperaturas, referidos como VHTD ou UHTD (Figura 2). O avanço da VHTD inclui significativa redução do tempo de secagem (5,5 horas para massas longas e 2,5 horas para massas curtas), melhor qualidade do produto final e redução do investimento e custos operacionais.

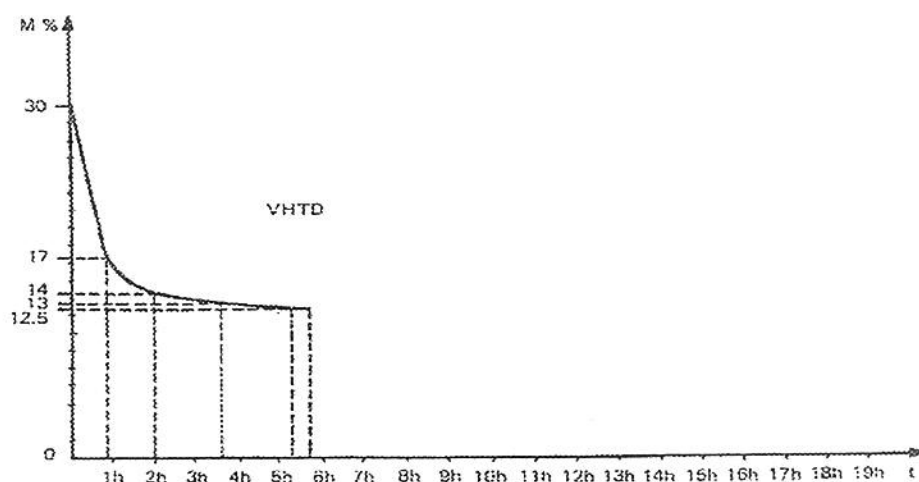


Figura 2 – Curva de umidade para produto de massa longa. M = umidade; t = tempo de secagem (ref. DONNELLY, B. J. 1991)

A tecnologia de microondas também tem apresentado bem sucedidas aplicações na secagem de massas curtas, ao contrário de massas longas que não havia, segundo o autor, apresentado até a data da publicação nenhuma viabilidade comercial (DONNELLY, 1991). O sistema de secagem para massas curtas consiste em três estágios: uma pré-secagem convencional por ar quente; a secagem por microondas e uma equalização. A figura 3 mostra uma típica curva de secagem da massa do tipo “Elbow Macaroni” de uma produção de 1500kg/h. Como pode ser observado pela figura, o tempo de secagem é menor que 2 horas. Outra vantagem reconhecida pela secagem por microondas inclui o

espaço requerido de 1/3 a 1/4 do espaço da secagem convencional; redução do tempo de secagem;

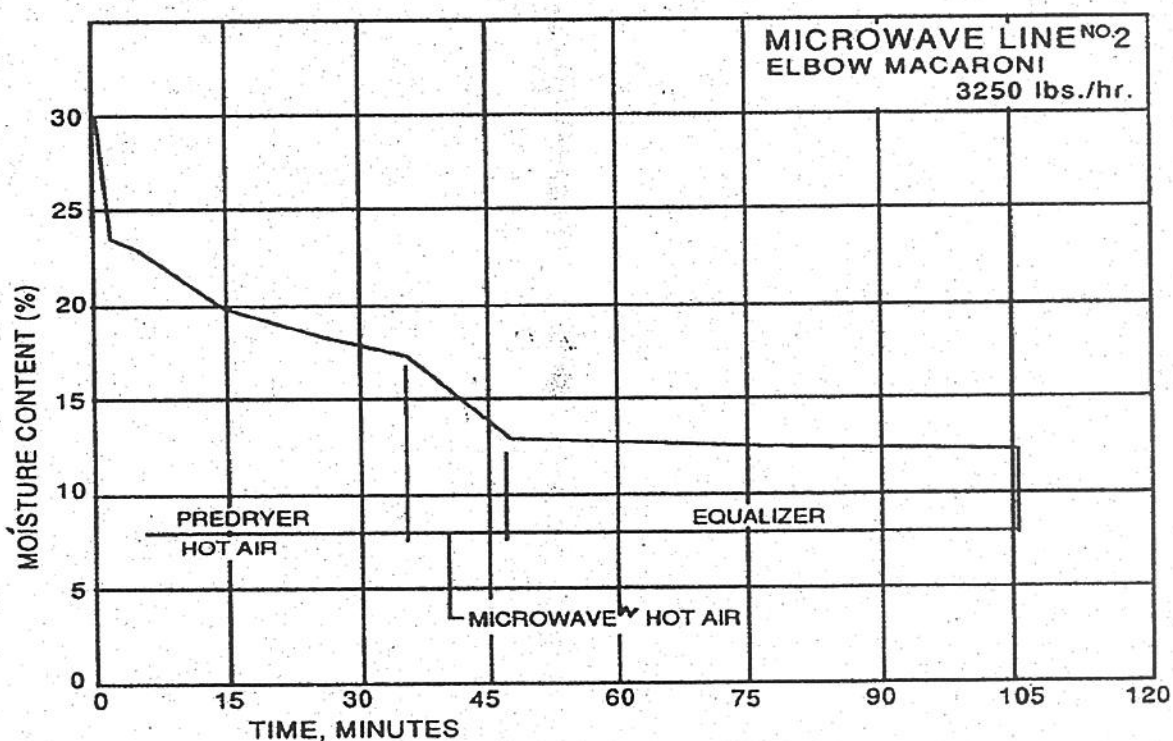


Figura 3- Curva típica de taxa de secagem com aplicação de microondas (ref. DONNELLY, B. J. 1991).

Segundo DECAREAU (1985), em um processo de secagem combinada com microondas de massa também do tipo “Elbow Macaroni”, seguindo o mesmo comportamento visto pela figura 3, as condições usadas foram: temperatura do ar de entrada = 82,2 °C; umidade relativa do ar de entrada = 15 a 20%, velocidade do fluxo de ar = 30 m/min; densidade de potência = 33,92 Wh/kg; tempo de secagem = 12 min; temperatura do produto final = 73,8 °C; umidade relativa do ar durante a equalização = 70 a 80%; umidade final do produto = 13 a 13,5%.

SMITH (1979) estudou a influência da aplicação de microondas durante o processo de secagem e concluiu que o aquecimento dielétrico, combinado com a convecção forçada convencional

e introduzido a partir da umidade crítica, apresenta efeito sinérgico na secagem, ou seja, velocidades de secagem mais altas do que a soma das velocidades de processos de secagem somente com convecção forçada ou somente com microondas. Isto é possível porque o gradiente de pressão no interior do alimento causado pelo aquecimento dielétrico favorece o transporte da umidade para a superfície, de onde ela é removida pelo ar seco. Deste modo, as microondas, a partir da umidade crítica, atuam no mecanismo limitante do processo convencional de secagem - a difusão de umidade - não permitindo a queda da velocidade de secagem e reduzindo o tempo de processamento. (FUNEBÓ & OHLSSON, 1998; DATTA, 1990; SVENSON, 1987; SMITH, 1979; MEISEL, 1976, citado por NITZ, 1999).

As principais vantagens no processo de secagem combinado com microondas são (SCHIFFMANN, 1987):

- *maior preservação do material*: pois a secagem pode ser efetuada em baixas temperaturas, não havendo necessidade de altas temperaturas de superfície, obtendo-se assim, menores gradientes de temperatura;
- *efeito nivelador*: há maior acoplamento de energia (eficiência da transferência de energia do equipamento para o produto) nas áreas mais úmidas;
- *maior uniformidade de secagem*: devido a perfis de temperatura mais uniformes e nivelamento da secagem;
- *melhoria do produto* : pois, em muitos casos, ocorre a eliminação do endurecimento da superfície e das tensões internas;
- *menor velocidade* : podendo ser reduzido o tempo de secagem em 50% ou mais;
- *menor espaço e manuseio requeridos* : trabalha-se com sistema de transporte contínuo;
- *maior eficiência* : a energia interage com o solvente e não com o substrato.

4- MATERIAL E MÉTODOS

4.1- Matéria – Prima

A matéria prima utilizada foi a massa curta do tipo *Penne*, de três formulações – trigo mole; trigo *durum* e trigo *durum* enriquecida com vegetal – espinafre, fornecida pelo **Pastificio Selmi S/A**, situado na cidade de Campinas – SP, a uma umidade de 23%. As peças individuais de massa foram cortadas ao meio em relação ao comprimento padrão comercializado, mediante o ajuste da velocidade da faca rotativa à saída do extrusor. As três formulações foram usadas nos experimentos realizados em nível de bancada, em um forno doméstico adaptado. Para os experimentos realizados no secador piloto, foi utilizada apenas a formulação com trigo *durum* e as peças individuais da massa foram cortadas ao meio em relação ao comprimento das peças usadas no forno adaptado. Desta forma, o comprimento da peça individual atendeu às exigências dimensionais para a alimentação e livre escoamento da massa no interior do equipamento piloto rotativo.

Após a extrusão, a matéria – prima passava pelo “trabatto”, um equipamento que efetua uma pré-secagem superficial da mesma, onde foi então coletada e transportada em caixas isotérmicas desde o pastificio até o Laboratório de Microondas Aplicadas (LMA), num percurso de 16 km, de duração aproximada de 25 minutos, sem que as peças individuais aglomerassem e grudassem entre si.

Já no LMA, a massa foi separada em porções em torno de 1200 gramas, acondicionadas em sacos de polietileno.

4.2- Equipamentos

4.2.1- Forno de Microondas Adaptado

Visando uma economia de matéria – prima e tempo e também maiores informações dos parâmetros iniciais para o processo, foi realizada uma adaptação em um forno doméstico Brastemp, “Double Emission System”, cavidade com volume de 38 litros, modelo BMC38-A, com 900W de potência nominal máxima e ajuste de tempo, para uma operação que permitia o controle das condições do ar de remoção da umidade gerada pela secagem.

Para isso, foram removidos da porta do forno os vidros interno e externo de proteção de uma tela metálica que retém as microondas dentro da cavidade de aplicação, não permitindo seu escape. Desta forma é possível permitir a admissão do ar dentro da cavidade do forno através do ajuste de uma peça metálica desenhada e construída de modo a encaixar-se na porta do mesmo. Esta peça foi interligada externamente a um sistema gerador de ar quente, composto por um ventilador centrífugo, uma válvula de esfera para controle do fluxo de ar, cuja medida é feita através de uma célula de fluxo laminar e de um manômetro “U” calibrado; ainda como parte do sistema, um aquecedor por resistência elétrica foi colocado após a seção de medição do fluxo de ar, controlado por dispositivo automático, com sensor do tipo terminal PT-100, além do que a temperatura do ar quente podia ser monitorada por um termopar e registrador. Durante todo o trajeto do ar após a sua passagem no aquecedor até a entrada no forno, o sistema foi revestido por lã de vidro, para o isolamento térmico. Na parte de trás do forno foi aplicado um outro ventilador como meio auxiliar da exaustão do ar de dentro da cavidade de aplicação. O forno adaptado pode ser visto nas figuras 4 e 5.



Figura 4: Forno de microondas doméstico adaptado a um sistema gerador de ar quente - (1) válvula de esfera; (2) ventilador centrífugo do ar de entrada; (3) manômetro “U”; (4) controlador de temperatura (5) aquecedor por resistência elétrica; (6) termômetro digital c/ termopar; (7) registrador de temperatura; (8) forno doméstico; (9) abraçadeira de conexão do forno com o sistema de ar quente; (10) ventilador centrífugo de exaustão; (11) medidor de vazão; (12) saída do ar.



Figura 5: Forno de microondas doméstico adaptado,

A partir da análise dos resultados dos ensaios de secagem realizados no forno doméstico adaptado foi determinada a faixa de condições operacionais mais favoráveis encontradas para a continuação deste estudo realizada no secador piloto rotativo.

Os níveis reais de potência oferecidos pelo forno foram calculados conforme metodologia descrita no **Apêndice B**.

4.2.2- Secador Rotativo Contínuo a Ar Quente Assistido a Microondas

A seguinte etapa de secagem da massa ocorreu em um protótipo de secador rotativo contínuo a ar quente assistido a microondas (figuras 6 e 7), desenvolvido no laboratório de microondas aplicadas (LMA), do DEA/FEA/UNICAMP (MARSAIOLI, 1991). O equipamento compõe-se de um cilindro secador rotativo de operação contínua, com ar quente em fluxo co-corrente ou contracorrente com o produto, desenhado para funcionar simultaneamente como um aplicador de microondas e equipado com recursos para controlar com precisão as vazões de ar e mássica do produto, a potência das microondas, a temperatura e umidade do ar quente e o tempo de residência do produto sob secagem, pelos ajustes independentes da rotação do cilindro e da sua inclinação em relação à horizontal.

A sua alimentação e a velocidade de rotação foram fixadas em função de uma ocupação ótima do volume do secador, de acordo com o tempo de residência. O ajuste da temperatura do ar foi feito através de um painel de controle do secador que comanda três bancos de resistências, mediante um sistema termostatzado automático com bulbo sensor aplicado a um dos bancos.

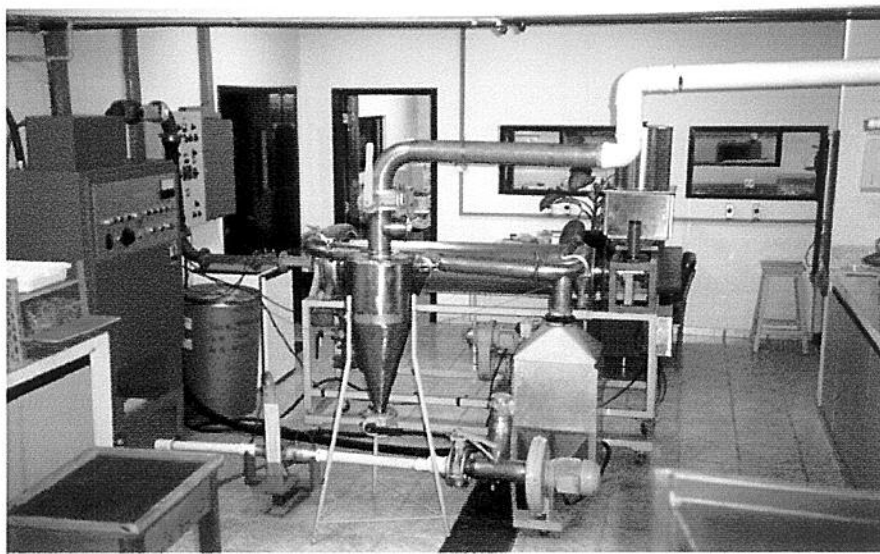


Figura 7- Secador rotativo contínuo a ar quente assistido a microondas

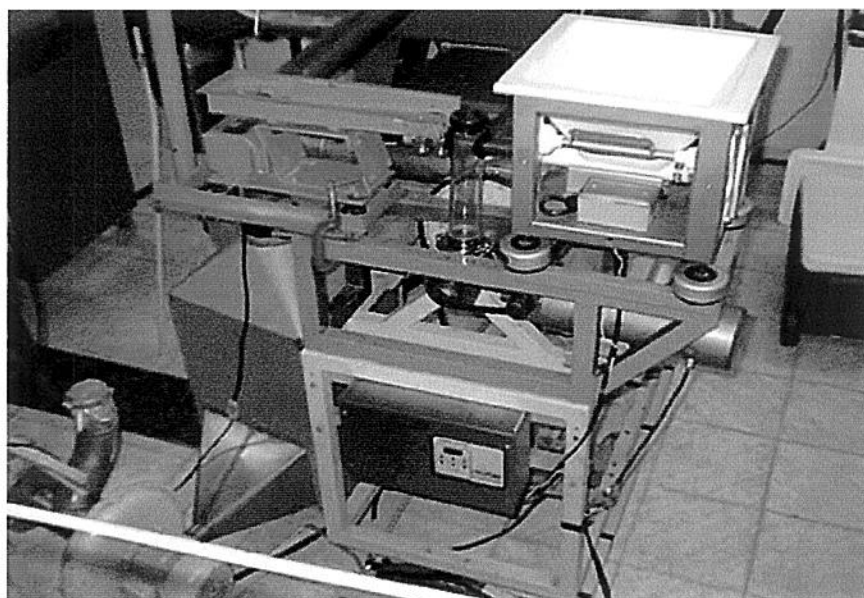


Figura 8- Adaptação de um alimentador do tipo rosca sem fim com um vibratório

4.3- Metodologia

4.3.1- Umidade

4.3.1.1- Determinação da Umidade Inicial

A determinação da umidade inicial da massa alimentícia foi realizada sempre que era coletada a matéria – prima da indústria e durante todos os outros dias em que se seguiam os experimentos. Para isso, a massa foi cortada em pequenos pedaços e então pesadas seis amostras de 1 grama cada, que foram colocadas em estufa com circulação de ar forçada, a 70° C, por uma hora. Em seguida as amostras foram transferidas para uma estufa à vácuo, a 70° C, por 24 horas, atingindo peso constante, depois resfriadas até temperatura ambiente em um dessecador e então pesadas em uma balança analítica. O teor de umidade foi calculado de acordo com a equação:

$$U = \frac{(P - Pf)}{P} * 100 \quad (4)$$

onde P é o peso inicial da amostra, Pf é o peso final e U é a umidade em % de base úmida.

4.3.1.2- Determinação da Umidade Final

O teor de umidade final da massa foi avaliado através do método oficial da “Official Methods of Analyses of AOAC International” – AOAC - número 926.07, sendo calculado de acordo com a equação 4 descrita no item 4.3.1.1.

Cada determinação foi feita em triplicata, após a saída do produto do secador, em cada uma das condições de secagem a que foi submetido.

4.3.2 - Planejamento Experimental dos Ensaio Realizados no Forno Doméstico Adaptado

A fim de estudar a influência de algumas variáveis no processo e o comportamento do macarrão perante o tratamento aplicado, foi desenvolvido um planejamento experimental do tipo *Fatorial Completo 2² com Três Pontos Centrais*, conforme a Tabela 1:

Tabela 1: Modelo do planejamento experimental

	VARIÁVEIS		RESPOSTAS	
			Produto sem Trincas (%)	
Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	Com Equalização	Sem Equalização
1	-1	-1		
2	1	-1		
3	-1	1		
4	1	1		
5	0,33	0		
6	0,33	0		
7	0,33	0		

As variáveis estudadas foram:

- Potência: nos níveis de 150W representado pelo -1; 200W referente ao 0,333 e 300W sendo o 1. O ponto central é o valor entre os dois níveis de uma variável estudada. Neste caso, os dois níveis de potência estudados foram 150 e 300W, devido às condições do forno utilizado, o único valor intermediário é o de 200W, assim o ponto central não foi o zero e sim o 0,33 referente ao 200W.
- Vazão : nos níveis de $0,8\text{m}^3/\text{min}$ representado pelo -1; $1,0\text{m}^3/\text{min}$ referente ao ponto central 0 e $1,2\text{m}^3/\text{min}$ sendo o 1.

Os valores dos níveis de potência e vazão foram determinados em função dos limites do equipamento e de testes preliminares.

As respostas analisadas foram:

- Trincas: ao final de cada secagem metade da massa foi resfriada sob condição ambiente – Sem Equalização, e a outra metade em um dessecador com ar a uma umidade relativa de 75%, processo denominado de Equalização, que visa um maior controle no surgimento de trincas quando o produto sai do secador (DECAREAU, 1985).

A análise de trincas foi realizada para todas as condições de secagem, no produto final equalizado e não equalizado. As peças de cada condição foram analisadas visualmente uma a uma e classificadas de acordo com o aparecimento ou não de trincas e sua intensidade: peças não trincadas, peças pouco trincadas e peças muito trincadas. As peças classificadas foram pesadas e assim, calculada a porcentagem de trincas da condição de secagem correspondente. Para o cálculo estatístico do planejamento, foi usado o valor correspondente à porcentagem de peças não trincadas.

O mesmo planejamento foi realizado para 3 diferentes formulações de macarrões: *Penne* trigo mole, *Penne* trigo durum e *Penne* trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre.

4.3.3- Ensaios de Secagem Realizados no Forno de Microondas Doméstico Adaptado

Antes do estudo no secador piloto foram feitos ensaios em um forno doméstico que foi devidamente adaptado. Os resultados analisados nessa etapa foram transferidos como ponto de partida para a avaliação do secador piloto rotativo contínuo.

Para cada ensaio, foram pesados cerca de 600 gramas de macarrão, distribuídos em porções iguais em dois cestos circulares construídos por tela de fibra de vidro e teflon, materiais transparentes a microondas, superpostos em um suporte de teflon e estes foram introduzidos no forno, sobre o seu prato giratório. Antes de cada secagem foi determinada a umidade relativa do ar ambiente antes deste ser aquecido ($U.R_0$) através da leitura das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, medidas em um termômetro, sendo que, para a última, foi posta uma mecha umedecida de algodão no bulbo do termômetro. O cálculo da umidade relativa foi determinado introduzindo os valores das duas temperaturas em um programa psicrométrico, instalado em uma calculadora HP 15C. A umidade relativa do ar de saída ($U.R_s$) foi calculada da mesma maneira, através da leitura das temperaturas de bulbo seco e úmido na saída do secador, em intervalos de tempo determinados.

O tempo de cada secagem foi pré - determinado experimentalmente, em função do necessário para se obter o produto com umidade final na faixa de 12 a 13%. Esse tempo foi variável de acordo com cada nível de potência aplicado.

O magnetron, elemento que gera a potência de microondas de um forno, possui um sistema de aletas para o seu resfriamento. Quando o forno está operando, uma certa quantidade de ar do ambiente entra para o resfriamento do magnetron e de outros componentes do gerador que dissipam calor. Nos testes realizados, independente das vazões do ar de entrada (0,8; 1,0; 1,2m³/min), a vazão do ar de saída foi sempre de 1,6m³/min. Desta forma, dentro da cavidade do forno durante as secagens, as massas de ar em condição ambiente, correspondentes às vazões de 0,8; 0,6 e 0,4 m³/min, misturaram-se com as massas do ar de entrada a 45°C, respectivamente, com as vazões citadas acima.

A temperatura final do produto foi determinada por um medidor de temperatura por infravermelho da marca Raytek PM Plus, assim que os cestos eram retirados do forno.

Após a secagem, os produtos dos dois cestos foram bem misturados e depois separados em porções iguais em recipientes plásticos. Metade da massa foi resfriada à temperatura ambiente e a outra metade em um dessecador, também sob temperatura ambiente, que continha uma solução de NaCl, para proporcionar um ar com umidade relativa de 75% (PERRY, 1997) para a equalização do produto. Em seguida, o produto foi envasado em sacos de plástico laminado, de composição de polipropileno e polipropileno bio-orientado, devido à sua característica impermeável.

4.3.4- Ensaios de Secagem Realizados no Secador Rotativo Contínuo a Ar Quente Assistido a Microondas

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de bancada, buscou-se reproduzir a melhor condição de secagem no secador piloto.

Para a obtenção do tempo de residência desejado do produto no secador piloto, foram estimados o ângulo de inclinação e a rotação do cilindro, através da equação empírica 5 (DĂSCĂLESCU, 1969):

$$\theta = k * \frac{L_d}{n * \operatorname{tg} \alpha * D_d} \quad (5)$$

onde: θ = tempo de retenção, min;

k = coeficiente complexo ($\simeq 0,5$);

n = velocidade de rotação do cilindro, RPM;

$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sen} v / \operatorname{sen} \lambda$, sendo v o ângulo de inclinação do cilindro e λ o ângulo de talude* do material ($\simeq 21,8^\circ$);

L_d = comprimento do cilindro (1,30m);

D_d = diâmetro interno do cilindro (0,30m).

Assim, a partir do tempo de residência desejado, parâmetro levantado com os experimentos realizados em bancada, e das dimensões do secador, foram calculados n e v .

* É o ângulo formado pela inclinação da superfície do cone em relação ao plano horizontal quando uma massa de grãos é depositada sobre um plano horizontal (PUZZI, 1986).

A vazão do ar de entrada foi de $2\text{m}^3/\text{min}$ em fluxo paralelo com o produto, mantendo a mesma temperatura de 45°C . Durante as secagens, os valores da umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador e da temperatura final do produto, foram medidos conforme descrito no item 4.3.4. Ao final da secagem, o produto foi transferido para dessecadores até atingir temperatura ambiente e depois embalados, também conforme descrito no item 4.3.3.

Nessa etapa do estudo, trabalhou-se apenas com a massa *Penne* de trigo durum, pois seu comportamento nos testes realizados na bancada foi semelhante ao da massa enriquecida com vegetal – espinafre. A massa de trigo mole não apresentou condições propícias de trabalho devido à textura, ocorrendo deformação do produto durante sua passagem pelo alimentador.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- Determinação da Potência Disponível de Microondas no Forno Doméstico

Os resultados dos níveis de potências reais oferecidos pelo forno de microondas, determinados conforme o método descrito no **Apêndice B**, podem ser vistos na Tabela 2:

Tabela 2 : Potência calculada disponível no forno de microondas doméstico

Especificações do Fabricante		Potência Calculada Disponível (W)		
		Voltagem da Rede de CA (V)		Média (V)
Níveis de Potência	Potência (W)	127,4	127,5	127,5
1	150	99,4	108,50	103,9
2	200	197,5	200,34	198,9
3	300	280,9	299,57	290,2
4	400	395,0	398,84	396,9
5	500	496,2	499,07	497,6
6	550	542,5	545,66	544,1
7	650	645,8	610,81	628,3
8	750	739,8	744,08	741,9
9	800	797,8	802,44	800,1
10	900	884,5	889,66	887,1

5.2-Resultados Obtidos nos Ensaio de Secagem Assistida a Microondas Realizados no Forno de Microondas Doméstico Adaptado

Conforme descrito no item 4.3.4, foram realizados ensaios de secagens no forno adaptado para os três tipos de macarrão: *Penne* trigo mole, trigo durum e trigo durum enriquecido com vegetais. Os resultados obtidos estão descritos a seguir.

5.2.1- Resultados Obtidos nos Ensaio Realizados com o Macarrão Tipo *Penne* de Trigo Mole

Tabela 3: Resultados dos ensaios de secagem realizados com *Penne* trigo mole

Teste	P (W)	t (min)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	U.R _o . ar entrada (%)	U. R _s . ar saída (%)	T ar entrada (°C)	T ar saída (°C)	U inicial massa (%)	T final massa (°C)	U final massa (%)
1	150	47	0,80	61,20	39,97-37,87	45±1	37-39	24,02	50-60	13,18
2	300	20	0,80	52,96	42,40-30,88	45±1	32-39	24,90	70-90	12,84
3	150	47	1,20	71,55	39,12-33,42	45±1	36-38	24,02	50-60	12,65
4	300*	20	1,20	63,64	34,31-26,95	45±1	39-41	24,90	80-90	12,44
5	200	25	1,00	61,20	37,87-35,16	45±1	39-40	24,02	60-90	12,10
6	200	25	1,00	67,63	44,71-38,68	45±1	32-40	24,02	60-80	13,55
7	200	25	1,00	51,98	37,28-27,94	45±1	34-39	24,90	60-75	12,78

* ocorreram pontos de coloração mais intensa – marrom – e manchas brancas no produto devido ao excesso de potência

A Tabela 4, mostra a relação entre cada nível de potência aplicada em seu determinado tempo e a quantidade de material a ser seco na forma de densidade de potência.

Tabela 4: Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado

Potência (W)	Densidade de Potência (Wh/kg)
150	195,83
200	138,89
300	166,67

A análise de trincas no produto final equalizado e não equalizado está apresentada na Tabela 5:

Tabela 5: Classificação de trincas no produto final

Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	TRINCAS (%)					
			SEM EQUALIZAÇÃO			COM EQUALIZAÇÃO		
			Sem Trinca	Pouca Trinca	Muita Trinca	Sem Trinca	Pouca Trinca	Muita Trinca
1	150	0,80	1,69	42,96	55,36	6,12	79,29	14,59
2	300	0,80	4,33	68,49	27,18	60,38	37,84	1,78
3	150	1,20	0,00	19,90	80,10	2,25	40,98	56,77
4	300	1,20	5,57	31,49	62,94	38,23	45,60	16,17
5	200	1,00	41,70	49,06	9,24	96,94	3,06	0,00
6	200	1,00	52,89	41,09	6,02	94,36	5,64	0,00
7	200	1,00	47,15	45,47	7,38	95,31	4,69	0,00

O produto seco em algumas das condições de secagem pode ser visto nas figuras abaixo:

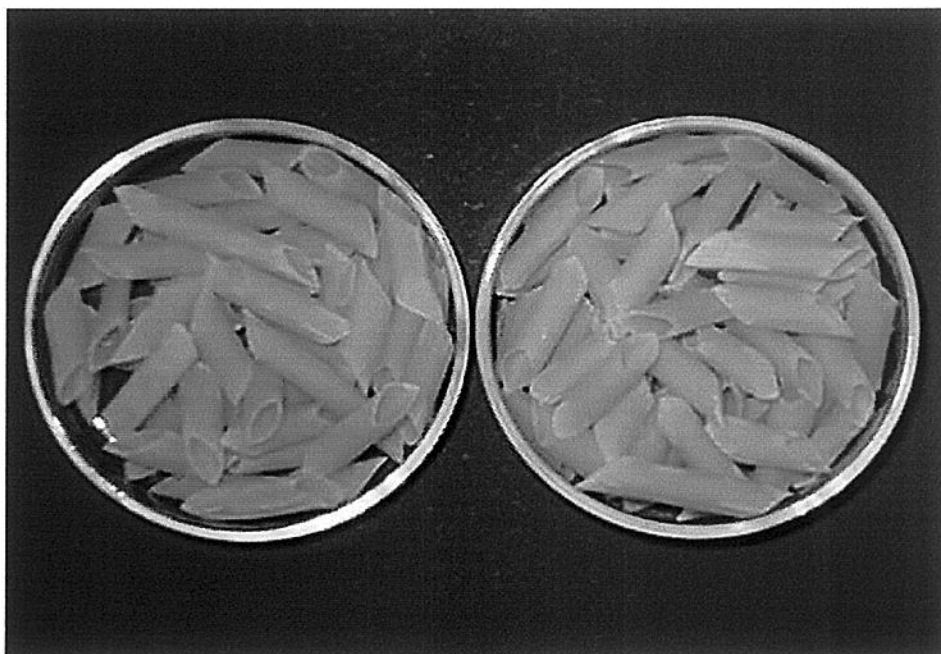


Figura 9: **Referente ao teste 3**, macarrão tipo *Penne* – trigo mole, seco a uma potência de 150W, vazão de $1,2\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 47 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.



Figura 10: **Referente ao teste dos pontos centrais**, macarrão tipo *Penne* – trigo mole, seco a uma potência de 200W, vazão de $1,0\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 25 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

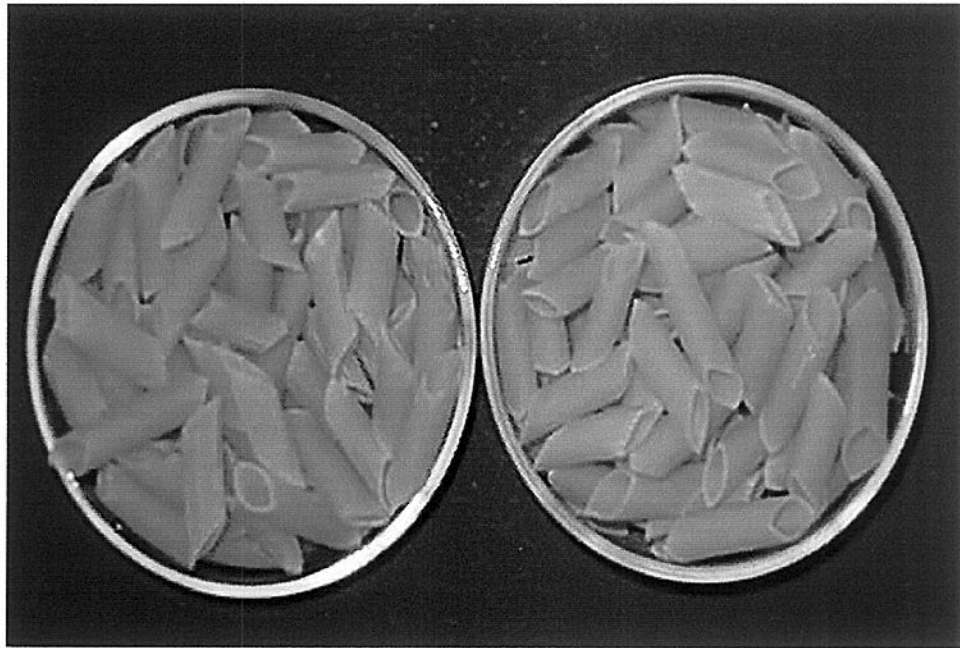


Figura 11: **Referente ao teste 4**, macarrão tipo *Penne* – trigo mole, seco a uma potência de 300W, vazão de 1,2m³/min, tempo de 20 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

Pode-se observar nas fotos e pela Tabela 5, que o produto seco nas condições do ponto central, apresenta o melhor resultado em relação ao não surgimento de trincas, seguido pelo produto obtido pelo teste 4, apesar deste ter queimado em alguns pontos (fato que não pode ser visualizado pelas fotos) e por último o teste 3. Nos três casos, o produto final equalizado mostra uma menor tendência ao surgimento de trincas.

5.2.1.1- Análise do Planejamento Experimental dos Ensaio com *Penne Trigo Mole*

A análise do comportamento do produto, perante o tratamento aplicado, foi realizada através do tratamento estatístico dos dados obtidos, pelo programa *Statistica* versão 5,0 (Microsoft, 1995). A tabela com as condições do tratamento e as respectivas respostas quanto à porcentagem de produto sem trincas, está apresentada a seguir:

Tabela 6: Porcentagem de macarrão de trigo mole sem trincas após os testes de secagens

			RESPOSTAS	
VARIÁVEIS			Produto sem Trincas (%)	
Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	Sem Equalização	Com Equalização
1	-1	-1	1,69	6,12
2	1	-1	4,33	60,38
3	-1	1	0,00	2,25
4	1	1	5,57	38,23
5	0,333	0	41,70	96,94
6	0,333	0	52,89	94,36
7	0,333	0	47,15	95,31

Tabela 7: Níveis da variável potência utilizados no planejamento experimental

Nível	-1	0,33	1
Potência (W)	150	200	300

Tabela 8: Níveis da variável vazão utilizados no planejamento experimental

Nível	-1	0	1
Vazão (m ³ /min)	0,8	1,0	1,2

Tabela 9- Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão Penne trigo mole sem equalização.

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	20,78	2,15	9,66	0,010537	11,52	30,03
(1) Pot. (L)	15,91	5,47	2,91	0,100685	-7,63	39,44
(2) Vaz (L)	-0,23	5,59	-0,04	0,971579	-24,30	23,87
1L x 2L	1,47	5,59	0,26	0,817964	-22,61	25,54

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coeficiente de Correlação $R = 0,2781$

Analisando a Tabela 9, observou-se que as duas variáveis, potência e vazão, não foram estatisticamente significantes para a obtenção de produto sem trincas quando não há equalização. A potência, porém, apresentou um efeito positivo, ou seja, em valores mais elevados a porcentagem de produto sem trincas foi maior. Esse comportamento pode ser visto na Tabela 5, onde a menor porcentagem de produto sem trincas aparece no nível de potência de 150W e a maior porcentagem no nível central correspondente a 200W. Outro fator observado foi a baixa porcentagem de produto muito trincado na potência de 200W. O tratamento com 300W mostrou também uma baixa

porcentagem de produto sem trinca, apesar de um pouco maior que o de 150W, mas ocasionou danos no produto final, como pode ser visto na Tabela 3. A vazão apresentou um pequeno efeito negativo.

O valor do desvio padrão foi baixo, mostrando que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. O baixo valor do coeficiente de correlação revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico. Se o modelo linear não se adequar para o tratamento, o próximo passo na análise do planejamento experimental é tentar o modelo quadrático (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1996). Esse modelo quadrático requer pontos axiais, ou seja, pontos abaixo do nível -1 e acima do nível $+1$, que em um planejamento fatorial 2^2 esse valor seria $-1,41$ e $+1,41$, o que não foi possível no equipamento utilizado devido aos seus intervalos níveis de potências já pré-estabelecidos.

Como o planejamento experimental para essa etapa foi desenvolvido com o objetivo de conhecer e estudar a influência de algumas variáveis no processo e no comportamento do macarrão perante o tratamento aplicado e não de se obter um modelo matemático que descrevesse esse comportamento, isso foi possível realizar através do tratamento linear.

Um baixo valor do coeficiente de correlação devido ao comportamento particular do produto ocorreu nas outras análises do planejamento descritas posteriormente devido às mesmas razões citadas aqui.

Tabela 10- Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão *Penne* trigo mole com equalização.

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	51,86	0,50	103,45	0,000093	49,71	54,02
(1) Pot. (L)*	61,69	1,28	48,37	0,000427	56,21	67,19
(2) Vaz (L)*	-13,01	1,30	-9,97	0,009910	-18,62	-7,39
1L x 2L*	-9,14	1,30	-7,00	0,019779	-14,75	-3,52

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coeficiente de Correlação $R = 0,6382$

Analisando a Tabela 10, observou-se que as duas variáveis, potência e vazão, foram estatisticamente significantes para a obtenção de produto sem trincas quando há equalização. A potência apresentou um efeito positivo, ou seja, em valores mais elevados a porcentagem de produto sem trinca foi maior. Já a vazão apresentou um efeito negativo para a obtenção de produto sem trincas. Porém, o efeito apresentado pela potência foi maior, quando comparado com o efeito da vazão, para a obtenção de produto sem trinca. Também como ocorreu na análise do produto não equalizado, as condições que apresentaram melhores resultados foram as referentes ao ponto central.

O valor do desvio padrão foi baixo, mostrando que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. O baixo valor do coeficiente de correlação revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico.

5.2.2- Resultados Obtidos nos Ensaio Realizados com o Macarrão Tipo *Penne* de Trigo Durum

Tabela 11: Resultados dos ensaios de secagem realizados com *Penne* trigo durum

Teste	P (W)	t (min)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	U.R ₀ . ar entrada (%)	U. R _s . ar saída (%)	T ar entrada (°C)	T ar saída (°C)	U inicial massa (%)	T final massa (°C)	U final massa (%)
1	150	47	0,80	64,39	44,02-25,40	45±1	32-40	23,00	50-60	14,35
2	300	20	0,80	64,39	38,22-31,77	45±1	35-40	23,00	85-110	13,37
3	150	47	1,20	76,33	39,55-31,52	45±1	32-36	23,82	50-65	14,64
4	300*	20	1,20	70,36	35,24-25,40	45±1	36-40	23,82	85-100	14,18
5	200	25	1,00	63,64	34,28-32,49	45±1	35-37	23,51	70-100	15,01
6	200	25	1,00	53,88	27,59-30,88	45±1	39	23,56	60-86	14,86
7	200	25	1,00	53,88	33,42-28,52	45±1	38-40	23,56	72-89	14,24

* ocorreram pontos de coloração mais intensa – marrom – e manchas brancas no produto devido excesso de potência

A Tabela 12, mostra a relação entre cada nível de potência aplicada em seu determinado tempo e a quantidade de material a ser seco na forma de densidade de potência.

Tabela 12: Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado

Potência (W)	Densidade de Potência (Wh/kg)
150	195,83
200	138,89
300	166,67

Como pode ser observado na Tabela 11, a umidade final do produto apresentou-se maior quando comparada com os ensaios realizados com o macarrão oriundo do trigo mole. Como o objetivo deste estudo foi o de obter um produto final com umidade entre 12 a 13%, novos testes foram feitos, aumentando o tempo de secagem correspondente a cada nível de potência, como pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13: Novos resultados dos ensaios de secagem realizados com *Penne* trigo durum

Teste	P (W)	t (min)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	U.R ₀ . ar entrada (%)	U. R _s . ar saída (%)	T ar entrada (°C)	T ar saída (°C)	U inicial massa (%)	T final massa (°C)	U final massa (%)
1	150	52	0,80	53,88	28,43-26,60	45±1	37-38	23,03	50-67	13,61
2	300	25	0,80	58,91	32,63-30,88	45±1	39-41	23,03	85-125	12,48
3	150	52	1,20	51,51	28,43-27,59	45±1	37-39	23,03	55-70	13,36
4	300*	25	1,20	51,51	26,34-24,32	45±1	41-42	23,56	93-124	11,59
5	200	30	1,00	49,25	36,16-26,34	45±1	37-41	23,56	65-90	13,57
6	200	30	1,00	53,88	24,42-20,53	45±1	39-41	23,56	60-85	13,19
7	200	30	1,00	51,51	26,60-23,38	45±1	38-41	23,56	60-85	13,56

* ocorreram pontos de coloração mais intensa – marrom – e manchas brancas no produto devido excesso de potência

A Tabela 14, mostra a relação entre cada nível de potência aplicada em seu determinado tempo e a quantidade de material a ser seco na forma de densidade de potência.

Tabela 14: Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado

Potência (W)	Densidade de Potência (Wh/kg)
150	216,67
200	166,67
300	208,33

A análise de trincas no produto final equalizado e não equalizado, da segunda sequência de experimentos, está apresentada na Tabela 15:

Tabela15: Classificação de trincas no produto final – Penne trigo Durum

Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	TRINCAS (%)					
			SEM EQUALIZAÇÃO			COM EQUALIZAÇÃO		
			Sem Trinca	Pouca Trinca	Muita Trinca	Sem Trinca	Pouca Trinca	Muita Trinca
1	150	0,80	34,43	65,57	0,00	97,19	2,81	0,00
2	300	0,80	11,99	56,74	31,27	30,47	58,13	11,40
3	150	1,20	8,57	87,10	4,33	79,87	20,13	0,00
4	300	1,20	7,11	47,31	45,57	37,68	53,94	8,38
5	200	1,00	49,71	49,78	0,51	100,00	0,00	0,00
6	200	1,00	59,67	39,26	1,07	93,07	6,93	0,00
7	200	1,00	61,93	37,40	1,31	91,46	8,54	0,00

O produto seco em algumas das condições de secagens pode ser visto nas próximas figuras.

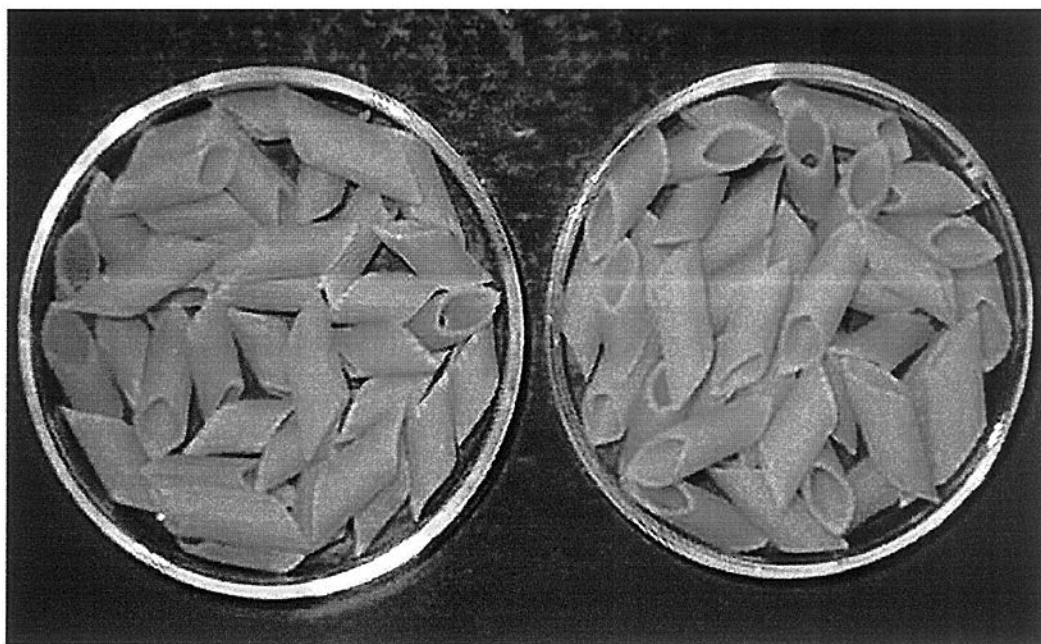


Figura 12: **Referente ao teste 3**, macarrão tipo *Penne* – trigo durum, seco a uma potência de 150W, vazão de $1,2\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 52 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

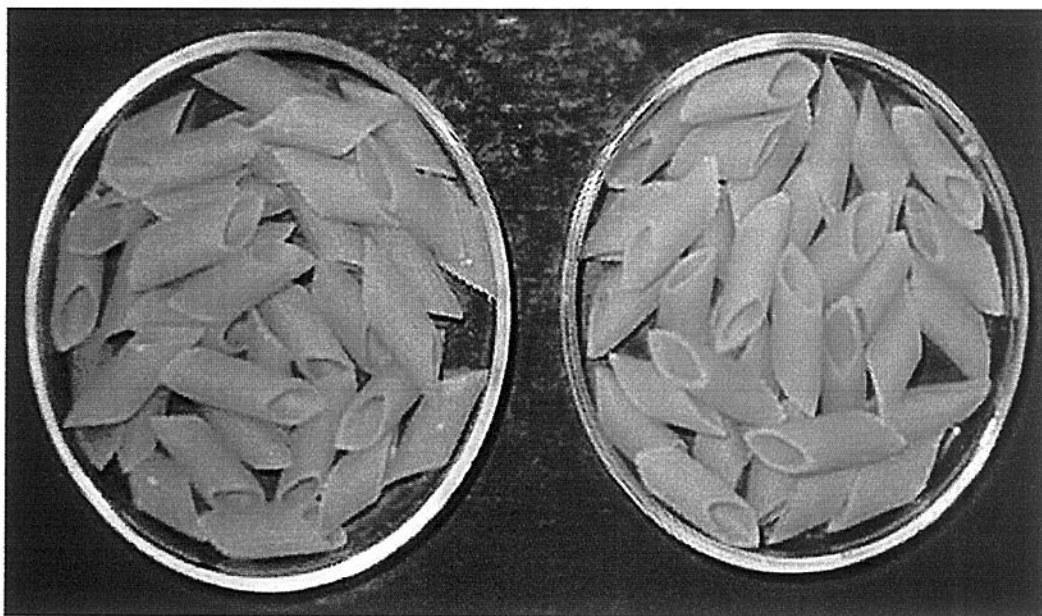


Figura 13: **Referente ao teste dos pontos centrais**, macarrão tipo *Penne* – trigo durum, seco a uma potência de 200W, vazão de $1,0\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 30 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

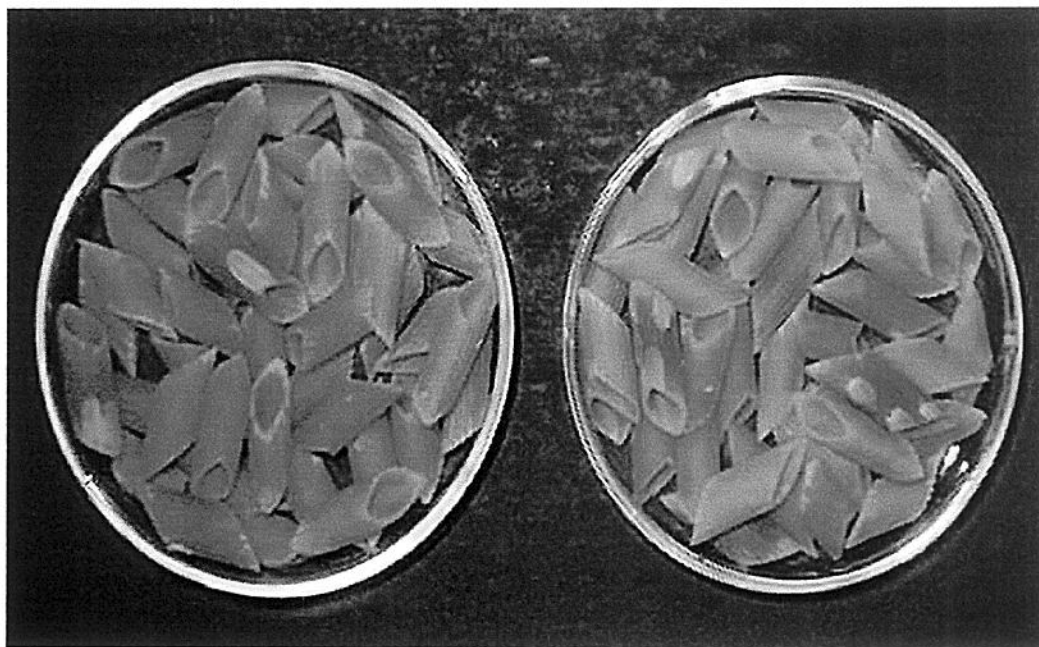


Figura 14: **Referente ao teste 4**, macarrão tipo *Penne* – trigo durum, seco a uma potência de 300W, vazão de 1,2m³/min, tempo de 25 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

Pode-se observar nas fotos e pela tabela 15, o produto final equalizado, mostra uma menor tendência ao surgimento de trincas. O produto seco nas condições do ponto central, apresenta a melhor aparência em relação às trincas (Figura 13), seguido pelo produto obtido pelo teste 3 e por último o teste 4, onde houve também a ocorrência de peças manchadas e queimadas.

5.2.2.2- Análise do Planejamento Experimental dos Ensaios com *Penne Trigo Durum*

A análise do comportamento do produto, perante o tratamento aplicado foi realizada como descrito no item 5.2.1.1. A tabela com as condições do tratamento e as respectivas respostas quanto à porcentagem de produto sem trincas, está apresentada a seguir:

Tabela 16: Porcentagem de macarrão de trigo durum sem trincas após os testes de secagem

			RESPOSTAS	
VARIÁVEIS			Produto sem Trincas (%)	
Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	Sem Equalização	Com Equalização
1	-1	-1	34,43	97,19
2	1	-1	11,99	30,47
3	-1	1	8,57	79,87
4	1	1	7,11	37,68
5	0,33	0	49,71	100,00
6	0,33	0	59,67	93,07
7	0,33	0	61,93	91,46

Tabela 17: Níveis da variável potência utilizados no planejamento experimental

Nível	-1	0,33	1
Potência (W)	150	200	300

Tabela 18: Níveis da variável vazão utilizados no planejamento experimental

Nível	-1	0	1
Vazão (m ³ /min)	0,8	1,0	1,2

Tabela 19- Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão Penne trigo durum sem equalização.

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	33,35	2,49	13,35	0,005568	22,59	44,10
(1) Pot. (L)	-0,08	6,35	-0,01	0,991249	-27,41	27,25
(2) Vaz (L)	-15,37	6,50	-2,36	0,141840	-43,34	12,60
1L x 2L	10,49	6,50	1,61	0,247997	-17,48	38,46

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coeficiente de Correlação $R = 0,3129$

Analisando a Tabela 19, observou-se que as duas variáveis, potência e vazão, não foram estatisticamente significantes para a obtenção de produto sem trincas quando não há equalização. A potência, porém, apresentou um efeito negativo, ou seja, em valores mais baixos a porcentagem de produto sem trincas foi maior. Esse comportamento pode ser visto na Tabela 15, onde a porcentagem de produto sem trincas foi maior no nível de potência de 150W quando comparada com o nível de 300W. Já a vazão apresentou um efeito positivo, apresentando um maior número de produto sem

trincas no nível de $1,2\text{m}^3/\text{min}$ quando comparado com o nível de $0,8\text{m}^3/\text{min}$. Porém, as condições do ponto central mostraram-se as mais satisfatórias.

O valor do desvio padrão foi baixo, mostrando que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. O baixo valor do coeficiente de correlação revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico.

Tabela 20- Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão *Penne* trigo durum com equalização

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	78,73	1,74	45,14	0,000490	71,23	86,24
(1) Pot. (L)*	-42,84	4,43	-9,66	0,010539	-61,92	-23,77
(2) Vaz (L)	-5,05	4,54	-1,11	0,381213	-24,58	14,47
1L x 2L	12,27	4,54	2,70	0,113957	-7,26	31,79

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coeficiente de Correlação $R = 0,6408$

Analisando a Tabela 20, observou-se que a potência foi estatisticamente significante para a obtenção de produto sem trincas quando há equalização, ao contrário da vazão, que não apresentou um efeito estatístico significativo. Porém, tanto a potência como a vazão, apresentaram um efeito negativo, ou seja, em valores mais baixos a porcentagem de produto sem trincas foi maior. Esse comportamento pode ser visto na Tabela 15, onde a porcentagem de produto sem trincas foi maior no nível de potência de 150W quando comparada com o nível de 300W e o mesmo ocorreu comparando

os dois níveis de vazão, $0,8\text{m}^3/\text{min}$ em relação a $1,2\text{ m}^3/\text{min}$. As condições do ponto central mostraram-se as mais satisfatórias.

O valor do desvio padrão foi baixo, mostrando que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. O baixo valor do coeficiente de correlação revela um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico.

5.2.3- Resultados Obtidos nos Ensaios Realizados com o Macarrão Tipo *Penne* de Trigo Durum Enriquecido com Vegetal - Espinafre

Tabela 21: Resultados dos ensaios de secagem realizados com *Penne* trigo durum

Teste	P (W)	t (min)	Vazão ar entrada (m^3/min)	U.R ₀ , ar entrada (%)	U. R _s , ar saída (%)	T ar entrada (°C)	T ar saída (°C)	U inicial massa (%) [*]	T final massa (°C)	U final massa (%)
1	150	47	0,80	60,48	32,49-27,59	45±1	37-39	-	50-70	13,43
2	300	20	0,80	53,88	32,49-28,52	45±1	37-40	-	70-102	13,53
3	150	47	1,20	55,59	33,42-30,88	45±1	38-39	-	51-61	13,69
4	300	20	1,20	54,75	34,31-27,24	45±1	39-42	24,40	70-102	11,59
5	200	25	1,00	59,72	36,16-30,88	45±1	37-39	24,40	66-76	13,74
6	200	25	1,00	54,75	36,16-30,88	45±1	37-39	24,40	69-76	13,54
7	200	25	1,00	54,75	36,16-30,88	45±1	37-39	24,40	62-88	12,74

* não foi possível determinar a umidade inicial nos testes 1, 2 e 3.

A Tabela 22, mostra a relação entre cada nível de potência aplicada em seu determinado tempo e a quantidade de material a ser seco na forma de densidade de potência.

Tabela 22: Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado

Potência (W)	Densidade de Potência (Wh/kg)
150	195,83
200	138,88
300	166,67

Assim como no item 5.2.2 foram feitos novos ensaios, aumentando o tempo de secagem correspondente a cada nível potência, como pode ser visto na Tabela 23.

Tabela 23: Novos resultados dos ensaios de secagem realizados com *Penne* trigo durum com vegetal

Teste	P (W)	t (min)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	U.R ₀ . ar entrada (%)	U. R _s . ar saída (%)	T ar entrada (°C)	T ar saída (°C)	U inicial massa (%)**	T final massa (°C)	U final massa (%)
1	150	52	0,80	57,59	28,97–27,59	45±1	37-39	-	50-65	12,69
2	300*	25	0,80	56,77	33,02–27,07	45±1	39-43	-	80-115	12,42
3	150	52	1,20	55,59	33,42–28,52	45±1	38-40	-	54-65	13,48
4	300*	25	1,20	55,59	31,77–27,07	45±1	40-43	-	75-118	11,89
5	200	30	1,00	53,88	36,16–30,88	45±1	37-39	24,40	65-85	14,67
6	200	30	1,00	53,88	36,16–30,88	45±1	37-39	24,40	66-86	13,08
7	200	30	1,00	59,72	36,16–30,88	45±1	37-39	24,40	66-89	12,64

* ocorreram pontos de coloração mais intensa – marrom – e manchas brancas no produto devido excesso de potência;

** não foi possível determinar a umidade inicial nos testes 1, 2, 3 e 4.

A Tabela 24, mostra a relação entre cada nível de potência aplicada em seu determinado tempo e a quantidade de material a ser seco na forma de densidade de potência.

Tabela 24: Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado

Potência (W)	Densidade de Potência (Wh/kg)
150	216,67
200	166,67
300	208,33

A análise de trincas no produto final equalizado e não equalizado, da segunda sequência de experimentos, está apresentada na Tabela 25:

Tabela 25: Classificação de trincas no produto final – *Penne* trigo Durum enriquecido com vegetal

Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	TRINCAS (%)					
			SEM EQUALIZAÇÃO			Com Equalização		
			Sem Trinca	Pouca Trinca	Muita Trinca	Sem Trinca	Pouca Trinca	Muita Trinca
1	150	0,80	91,54	8,46	0,00	100,00	0,00	0,00
2	300	0,80	10,09	84,45	5,46	94,80	5,20	0,00
3	150	1,20	99,13	0,87	0,00	100,00	0,00	0,00
4	300	1,20	70,16	29,84	0,00	100,00	0,00	0,00
5	200	1,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
6	200	1,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
7	200	1,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00

O produto seco em algumas das condições de secagem pode ser visto nas próximas figuras.

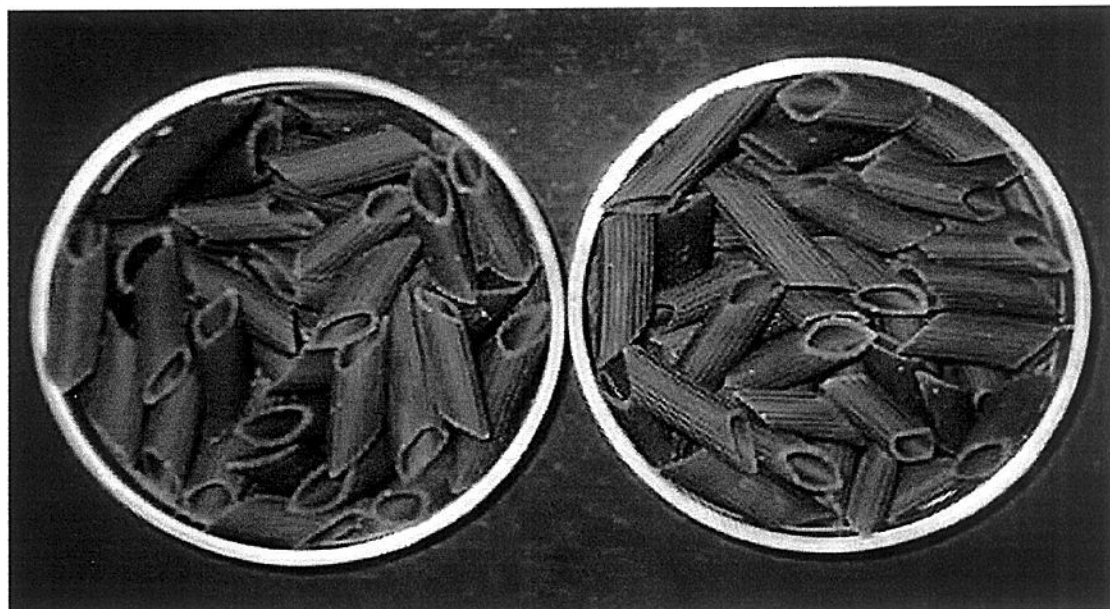


Figura 15: **Referente ao teste 3**, macarrão tipo *Penne* – trigo durum enriquecido com vegetal - espinafre, seco a uma potência de 150W, vazão de $1,2\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 52 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

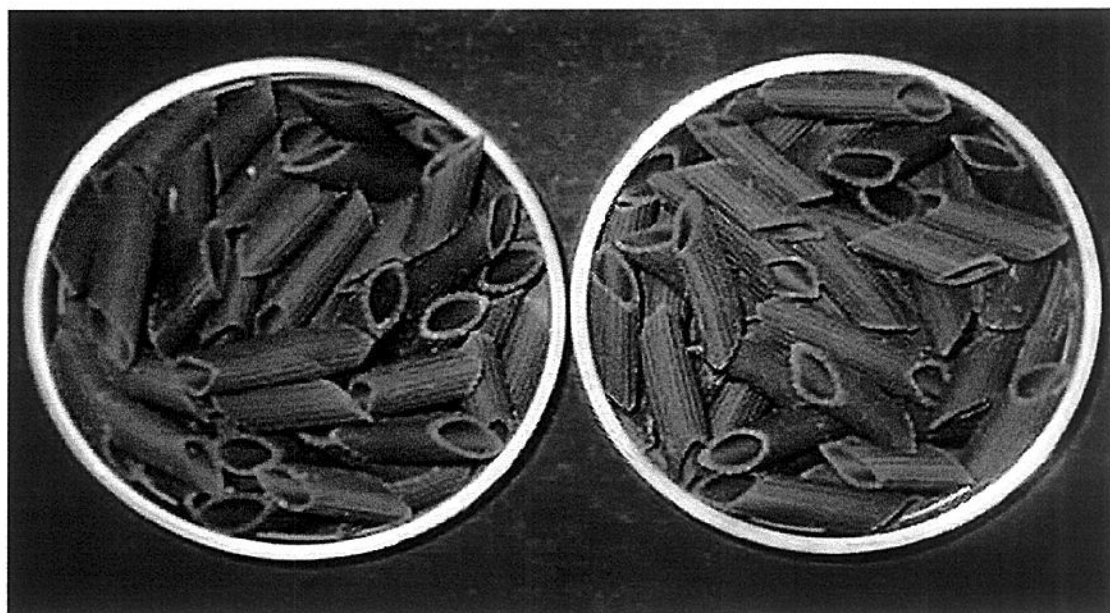


Figura 16: **Referente aos testes do ponto central**, macarrão tipo *Penne* – trigo durum enriquecido com vegetal - espinafre, seco a uma potência de 200W, vazão de $1,0\text{m}^3/\text{min}$, tempo de 30 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

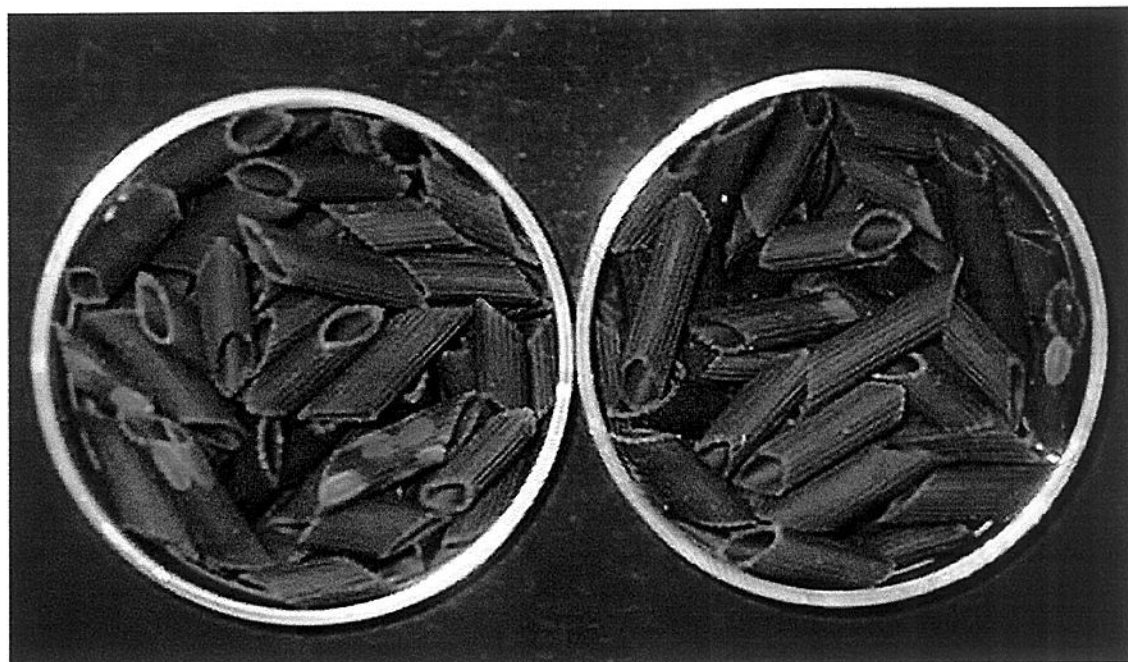


Figura 17: **Referente ao teste 4**, macarrão tipo *Penne* – trigo durum enriquecido com vegetal - espinafre, seco a uma potência de 300W, vazão de 1,2m³/min, tempo de 25 minutos. A esquerda tem-se o produto não equalizado e a direita tem-se o produto equalizado.

Pode-se observar nas fotos e pela Tabela 25, que o produto enriquecido com vegetal apresentou o melhor resultado em relação ao surgimento de trincas no produto final. A presença de produto com muita trinca foi notada apenas no teste 2 (sem equalização), porém em baixa porcentagem, sendo maior o número de produto com pouca trinca. Praticamente em todos os testes em que houve a equalização, o produto final não apresentou trincas. Entretanto nos testes referentes ao nível de potência de 300W (figura 17), o produto apresentou pontos de coloração marrom e manchas brancas devido ao excesso de potência.

5.2.3.2- Análise do Planejamento Experimental dos Ensaios com *Penne* Trigo Durum Enriquecido com Vegetal - Espinafre

A análise do comportamento do produto, perante o tratamento aplicado, foi realizada como descrito no item 5.2.1.1. A tabela com as condições do tratamento e as respectivas respostas quanto à porcentagem de produto sem trincas, está apresentada a seguir:

Tabela 26: Porcentagem de macarrão de trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre sem trincas após os testes de secagens.

			RESPOSTAS	
VARIÁVEIS			Produto sem Trincas (%)	
Teste	Potência (W)	Vazão (m ³ /min)	S/E	C/E
1	-1	-1	91,54	100,00
2	1	-1	10,09	94,80
3	-1	1	99,13	100,00
4	1	1	70,16	100,00
5	0,33	0	100,00	100,00
6	0,33	0	100,00	100,00
7	0,33	0	100,00	100,00

Tabela 27: Níveis da variável potência utilizados no planejamento experimental

Tabela 28: Níveis da variável vazão utilizados no planejamento experimental

Nível	-1	0	1
Vazão (m ³ /min)	0,8	1,0	1,2

Tabela 29- Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão *Penne* trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre, sem equalização.

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média	84,67	0,00	-	-	-	-
(1) Pot. (L)	-44,03	0,00	-	-	-	-
(2) Vaz (L)	33,83	0,00	-	-	-	-
1L x 2L	26,24	0,00	-	-	-	-

Coeficiente de Correlação R= 0,7611

Analisando a Tabela 29, observou-se que as duas variáveis, potência e vazão, não foram estatisticamente significantes para a obtenção de produto sem trincas quando não há equalização. A potência, porém, apresentou um efeito negativo, ou seja, em valores mais baixos a porcentagem de produto sem trincas foi maior. Esse comportamento pode ser visto na Tabela 25, onde a porcentagem de produto sem trincas é maior no nível de potência de 150W quando comparada com o nível de 300W. Já a vazão apresentou um efeito positivo, apresentando um maior número de produto sem trincas no nível de 1,2m³/min quando comparado com o nível de 0,8m³/min. Porém, as condições do ponto central mostraram-se as mais satisfatórias.

O valor do desvio padrão foi zero, já que não houve respostas diferentes nas replicatas do ponto central.

Tabela 30- Coeficiente de regressão, desvio padrão, valor t, valor p e limites de confiança, utilizando o macarrão *Penne* trigo durum enriquecido com vegetal – espinafre, com equalização.

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média	99,41	0,00	-	-	-	-
(1) Pot. (L)	-2,13	0,00	-	-	-	-
(2) Vaz (L)	2,60	0,00	-	-	-	-
1L x 2L	2,60	0,00	-	-	-	-

Coeficiente de Correlação $R = 0,8881$

Analisando a Tabela 30, observou-se que as duas variáveis, potência e vazão, não foram estatisticamente significantes para a obtenção de produto sem trincas quando não há equalização. A potência, porém, apresentou um efeito negativo, ou seja, em valores mais baixos a porcentagem de produto sem trincas foi maior. Esse comportamento pode ser visto na Tabela 25, onde a porcentagem de produto sem trincas foi maior no nível de potência de 150W quando comparada com o nível de 300W. Já a vazão teve um efeito positivo, apresentando um maior número de produto sem trincas no nível de $1,2\text{m}^3/\text{min}$ quando comparado com o nível de $0,8\text{m}^3/\text{min}$. Porém, as condições do ponto central mostraram-se as mais satisfatórias.

O valor do desvio padrão foi zero, já que não houve respostas diferentes nas replicatas do ponto central, portanto não há como calcular os valores de t, p e dos limites de confiança.

5.2.4- Discussão Geral dos Ensaios de Secagens Assistida a Microondas no Forno Doméstico

Adaptado

Avaliando os resultados obtidos nos ensaios de secagem para os três tipos de macarrão foi observado que a massa proveniente do trigo mole necessitou de um menor tempo de secagem para atingir uma umidade final próxima de 12 a 13% em b.u. quando comparada às massas de trigo durum e de trigo durum enriquecidas com vegetal – espinafre. Porém, esse tipo de massa apresentou maior disposição para o surgimento de trincas no produto final.

Na análise dos planejamentos experimentais, para os três tipos de macarrões, as condições referentes ao ponto central apresentaram os melhores resultados, ou seja, em potência de 200W e vazão de 1,0m³/min houve uma maior porcentagem de produto final sem trincas. Outro fator importante observado foi à influência positiva para a obtenção de produtos sem trincas da equalização durante o resfriamento das massas.

5.3-Resultados Obtidos nos Ensaio de Secagem Assistida a Microondas Realizados no Secador Piloto

A partir dos resultados obtidos em bancada, onde a melhor condição foi potência 200W, para uma quantidade de massa de 600g, num tempo de 30 minutos, 166,67Wh/kg de densidade de potência, foram iniciados os ensaios no secador piloto.

Através da equação 3, descrita no item 4.3.5, para um tempo de retenção do material de 30 minutos, foi calculado o ângulo de inclinação do cilindro, $\nu = 1,2^\circ$ e o número de rotação, $n = 1,26\text{rpm}$.

O volume máximo do secador piloto é de 91 litros, sendo que seu volume ótimo de trabalho é de 7,5% de ocupação (MISKELL & MARSHALL, 1956). A vazão de alimentação do secador foi calculada a partir do volume específico do macarrão com 1/4 do seu tamanho padrão comercial, na umidade média de 23% b.u., em função do volume ideal de trabalho e dos ciclos de secagem em uma hora. O volume específico do produto é de 3 litros/ kg, em uma ocupação de 7,5% do cilindro, a estimativa de retenção de produto por ciclo de secagem foi de aproximadamente 2,34kg de massa à 23%, ou seja, aproximadamente 4,5kg/h de material.

Foi feita uma calibração no alimentador para obter a vazão de entrada no secador de 4,5kg/h, onde o alimentador de rosca operou em uma rotação de número 225 e acoplado a ele uma vibração de 80%.

Inicialmente trabalhou-se com uma potência de 850W, correspondendo a uma densidade de potência de 188,89Wh/kg. O tempo de residência médio real do secador, para os valores calculados de inclinação e rotação do cilindro foi determinado através da relação de retenção de material dentro do secador. Observou-se que o tempo médio do material foi de 18 a 19 minutos, valor inferior ao estipulado de 30 minutos, o que pode ter ocorrido devido ao favorecimento do escoamento em função do fluxo paralelo do ar de secagem. Nestas condições o produto não atingiu a umidade final desejada, apresentando um valor de 15,09 – 15,46%.

Foi realizada uma nova secagem mantendo as condições de inclinação e rotação do cilindro e aumentando a potência aplicada, que foi de 1kW, correspondente a 222,22Wh/kg. Nestas condições o produto final atingiu uma faixa de 14,79 a 14,33% de umidade final. Na sequência do experimento, foi aumentado para 1,2kW o valor da potência, correspondente a 266,67Wh/h, o que resultou em um produto final com umidades entre 13,83 a 13,37%, porém algumas peças apresentaram manchas brancas. Os resultados dos ensaios estão descritos na Tabela 31:

Tabela 31: Resultados apresentados nos ensaios realizados no secador piloto

P (W)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	UR ar entrada (%)	T ar entrada (°C)	UR ar saída (%)*	T ar saída (°C)*	T massa final (°C)	U inicial da massa (%)	U final massa (%)
850	2,0	53,88	45	43,95	37	57 – 74	23,25	15,09 – 15,46
1000	2,0	49,25	45	42,34	40	72 – 86	23,67	14,33 – 14,79
1200	2,0	49,25	45	-	-	91 - 104	23,67	13,37 – 13,83

* não foi possível determinar a umidade relativa no ar de saída.

A partir dos resultados observou-se que o equipamento apresentou condições favoráveis de secagem. Apesar do aparecimento de manchas brancas, o que ocorreu em pouquíssimas peças, o produto não apresentou problemas com trincas. A umidade final do produto atingida está próxima da desejada.

Um problema observado foi na estimativa do tempo de residência médio do secador, o que gerou a necessidade de trabalhar com uma potência maior decorrente do tempo de secagem menor do produto.

Foi realizado um teste de cozimento, no produto seco à potência de 1200W a fim de se obter uma comparação qualitativa entre o tempo necessário para cozinhar a massa seca pelo processo convencional e o processo combinado de ar quente com microondas. Para isso, foi adicionado 100g de massa em água fervente e medido o tempo de cozimento total da massa. O tempo necessário para o cozimento do produto seco pelo método combinado foi de 10 minutos, o mesmo tempo que levou o produto seco pelo método convencional a cozinhar totalmente.

5.4- Aspectos Econômicos da Ampliação de Escala

A justificativa para a compra de um sistema processador a microondas para alcançar uma economia significativa de energia está baseada no fato de que muitos processos de aquecimentos convencionais são tão ineficientes que uma parte ou todo o equipamento pode ser substituído por uma unidade a microondas mais eficiente, cujos custos de capital podem ser repostos após um número de anos através de economia no uso da energia (METAXAS, 1988).

Para o caso específico do macarrão curto tipo *Penne* considere-se uma linha de processamento convencional como a descrita por BARTHOLOMAI (1987), de capacidade de 350kg/h de produto a 12,5% de umidade (equipamento O. M. Pavan SpA, Galliera Veneta, Itália). Pelo uso dos dados técnicos e econômicos apresentados no perfil deste pastificio citado pelo autor, chega-se à conclusão que o custo unitário industrial deste produto monta a cerca de US\$ 0,533/kg de produto. Abstraindo-se hipoteticamente dos custos de investimento e operacional devidos à operação de secagem, o custo unitário cairia para US\$ 0,502/kg de produto.

Com base nos resultados deste estudo e considerando a ampliação de escala para 350kg/h de produto final a 12,5% de umidade, pode-se estimar o custo devido ao processamento por microondas da seguinte forma:

P_{ta} = Potência teórica para aquecer o produto a 80°C:

$$P_{ta} = M * C_p * \Delta T \quad (6)$$

onde, $M = \text{kg/s}$

$C_p = \text{kJ/kg}^\circ\text{C}$

$\Delta T = ^\circ\text{C}$

Assim:

$$P_{ta} = (350 / 3600) * 1,435 * 50 = 6,976 \text{ kW}$$

P_{te} = Potência teórica para evaporar a umidade do produto

$$P_{te} = M * (m_1 - m_2 / 100 - m_1) * L_h \quad (7)$$

onde, m_1 e m_2 = umidades inicial e final do produto em base úmida

L_h = calor latente de evaporação da água a 80°C

Assim:

$$P_{ta} = (350 / 3600) * (23 - 12,5 / 100 - 23) * 2309 = 30,612 \text{ kW}$$

A potência teórica total necessária será igual à soma das anteriores, ou seja:

$$P_t = P_{ta} + P_{te} = 6,976 + 30,612 \simeq 37,6 \text{ kW} \quad (8)$$

Considerando uma eficiência de acoplamento de 80% chega-se ao valor da potência do gerador de:

$$P_g = P_t / \eta_a = 37,6 / 0,8 \simeq 47,0 \text{ kW} \quad (9)$$

Adota-se o valor mais próximo disponível comercialmente, que é a unidade de 50kW = P_g .

Assumindo-se o valor instalado da unidade geradora de microondas como de US\$ 2000/kW, o seu custo fica:

$$C_{mo} = \text{US\$ } 2000/\text{kW} * 50\text{kW} = \text{US\$ } 100000 \quad (10)$$

Um aplicador rotativo industrial de microondas de corpo cilíndrico, com capacidade produtiva de 350kg/h, custaria estimativamente US\$ 60000 (PETER & TIMMERHAUS, 1991) o que soma um investimento total para o sistema a microondas de valor US\$ 160000.

O custo de operação desta unidade é calculado com base no rendimento de transmissão da potência desde a rede elétrica até a saída do gerados (η_g) de aproximadamente 55%, isto é:

$$P_r = P_g / \eta_g = 47 / 0,55 = 85,4 \text{ kW} \quad (11)$$

Ao preço do kWh de $g_o = \text{US\$ } 0,10$, o custo total da energia drenada da rede ficaria:

$$C_{er} = g_o * P_r * 1 \text{ hora} = 0,10 * 85,4 * 1 = \text{US\$ } 8,54/\text{h} \quad (12)$$

Como em uma hora se produz 350kg de massa curta, tem-se:

$$g_{mol} = C_{er} / 350 = 0,024 \text{ US\$ / kg} \quad (13)$$

Vale destacar que a este custo deverá ser acrescido aquele correspondente à depreciação do investimento, a qual, a exemplo dos demais equipamentos, será atribuída uma taxa de 12% ao ano (5500h trabalhadas), isto é:

$$g_{mo2} = (0,12 * 160000) / (5500 * 350) = 0,010 \text{ US\$ / kg} \quad (14)$$

Portanto o custo total da nova alternativa de secagem ficaria:

$$g_{mot} = g_{mol} + g_{mo2} = 0,024 + 0,010 = 0,034 \text{ US\$ /kg de produto} \quad (15)$$

Somando esta parcela ao custo do processo da linha convencional sem secagem, que foi estimado em US\$ 0,502/ kg de produto, obtém-se o custo total do processo com a secagem convencional substituída pelo processo a microondas:

$$g_{mo} = g_{mot} + 0,502 = \text{US\$ } 0,536/\text{kg produto} \quad (16)$$

Este custo é ligeiramente maior do que o da linha de processo convencional, que foi estimado em US\$ 0,533/kg de produto.

A vantagem da alternativa a microondas fica reduzida, principalmente, a uma redução do espaço ocupado pela área de secagem a cerca de apenas 20% daquela original.

Resumindo este ensaio de análise econômica pode-se com certeza esperar uma melhoria considerável do aproveitamento energético se for utilizado o atual pré-secador convencional para uma efetiva secagem inicial até o nível de umidade crítica do produto, aproximadamente 18% (NITZ, 2000), complementada com a secagem final a microondas até o nível de umidade de 13 a 12 %.

Outra alternativa a ser considerada poderia ser a inserção da energia de microondas entre dois estágios de secagem convencional (DECAREAU, 1985; METAXAS, 1988), com a vantagem de que a cessão de microondas para a evaporação da umidade se reduz a um mínimo, apenas servindo para o aquecimento interior do produto mais eficiente ao ponto de melhorar a difusividade mássica da umidade em direção à interface produto – ar, estando este a uma temperatura igual ou superior a 80°C.

6- CONCLUSÕES

O processo de secagem de massa curta assistida a microondas mostrou-se eficiente, tanto no tempo de secagem como na obtenção do produto final sem fissuras. O tempo da secagem assistida a microondas, quando comparado ao do processo convencional mostrou-se muito importante. A duração da secagem convencional, conduzida pelo pastificio que nos cedeu a matéria prima, do ponto de nossa coleta até o final da secagem, é de aproximadamente seis horas e meia, enquanto o necessário para as condições do ponto central do planejamento foi em torno de meia hora, ou seja, 13 vezes menor que o processo convencional.

Os ensaios realizados em bancada mostraram que a massa de formulação oriunda do trigo mole apresenta um tempo de secagem menor quando comparada à massa de trigo durum, porém possuem uma maior disposição ao surgimento de trincas. Tanto para a massa de trigo mole, como para a de trigo durum, a equalização ao final da secagem foi importante para o controle de trincas no produto final.

O equipamento piloto contínuo mostrou bons resultados, o produto atingiu uma umidade final na faixa de 13,5%, próxima da faixa desejada de 12 a 13%, em um tempo de 18 a 19 minutos.

Apesar da análise de custo mostrar um valor do produto seco à partir de microondas ligeiramente maior do que o do produto seco pelo método convencional, isso não desmerece a eficiência econômica do processo, visto que das referências de onde foram tiradas as bases de cálculos não tem como se estimar a precisão dos dados.

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na continuidade desta pesquisa, sugere-se a continuação do estudo no secador piloto rotativo contínuo assistido a microondas, buscando uma condição ótima de tempo de residência e potência aplicada.

Outra sugestão seria o estudo da aplicação das microondas em um processo decorrente de uma pré – secagem com ar quente e o estudo do melhor ponto de umidade do produto para iniciar nesse processo a aplicação da secagem combinada com microondas e ar quente.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMA – Associação Brasileira da Indústria de Massas Alimentícias **Citações e referências a documentos eletrônicos**. Disponível na Internet: <http://www.abima.com.br>. Fev. 2001.

AL-DURI. B.; MC INTYRE. S. Comparison of Drying Kinetics of Foods Using a Fan- Assisted Convection Oven, a Microwave Oven and a Combined Microwave/Convection Oven. **Journal of Food Engineering**, England: Elsevier Science Publishers Ltd., v. 15, p. 139-155, 1992.

BARTHOLOMAI, A. **Food Factories** – Processes, Equipamente, Cost. Alemanha: Weinheim, 1987, 84p.

CIACCO, C. F.; CHANG, Y. K. **Teoria de massas alimentícias**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982. Teoria da secagem, p. 145-154, Série Tecnologia industrial, 8.

DÄSCÄLESCU, A. **Le séchage et ses aplications industrielles**. 2 ed. Paris : Dunod, 1969. 536p.

DECAREAU, R. V. **Microwaves in the food processing industry**. Chichester: Ellis Horwood, 1986. 224p.

DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. **Dehydration Microwave processing and engineering**. Academic Press, Inc., 1985. cap. 5, 79-112p.

- DONNELLY, B. J. Pasta: raw material and processing. In: KLAUS, J. L. & KAREL, K. **Handbook of cereal science and technology**. Marcel Dekker, Incr, 1991. Cap: 19 p. 763-792.
- GOLDBLITH, S.A. Basic principles of microwaves and recent developments. **Adv. Food Res.** **15**, 1967, 277-301p
- HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. **Agricultural Process Engineering**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 402p.
- LANE, R.H. Cereal foods. In: Curniff P. **Official methods of analysis of AOAC international**. 16 ed. Gaithersburg: AOAC, 1997, 1v., cap. 32, p. 38.
- LIRICI, L. L'essiccazione delle paste alimentari. **Técnica Molitoria**, 41, v.6, giugno, p. 470-481, 491, 1990.
- MARSAIOLI JR. A. **Desenvolvimento de um protótipo de secador cilíndrico – rotativo a microondas e a ar quente para a secagem contínua de produtos sólidos granulados**. Campinas, 1991. 197p. Dissertação (Doutor em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- MAURER, R. L.; TREMBLAY, M. R.; CHADWICK, E. A. Microwave of pasta: improves product, reduces cost and production time. **Food Tecnology**, Chicago: Institute of Food Technologists, v. 25, p. 32-37, Dec. 1971.

- METAXAS, A . C.; MEREDITH, R. J. **Industrial Microwave Heating**. 2. ed. London: Peter Peregrinus, 1988. 357 p.
- MILATOVIC, L. J.; MONDELLI, G. **Pasta technology today** Trad. De Cinzia Tussardi. Chiriotti, 1991. 349p.
- MISKELL. F.; MARSHALL Jr, W. R. A Study of retention time in a rotary dryer. **Chemical Engineering Progress**, v. 52. n. 1, p. 35-38, Jan. 1956.
- Moisture – Air oven methods. **American Association of Cereal Chemists Approved Methods (AACC)**, 9 ed. vol. 2
- MUDGETT, R. E. Eletrical properties of foods. In: RAO, M. A. (Ed.) **Engineering properties of food** 2. Ed. New York, 1996. P. 389-456.
- NELSON, S.O. Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 23 (), p.1314-1317, 1980.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos** 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1996. 299p.
- NITZ, M. **Secagem de macarrão assistida por microondas**. Campinas. 1999. 68 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook** The Mc Graw-Hill Companies, Inc., 7. ed. 1997.
- PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos**. São Paulo: Instituto Campineiro do Ensino Agrícola, 1986. 603p.
- RDRE. **Reference data for radio engineers**, 5th. ed., H.W. Sams, N. York, 1968.
- ROUSSY, G.; PEARCE, J. A. **Foundations and industrial applications of microwaves and radio frequency fields**: Physical and chemical processes. John Wiley & Sons, 1995.
- SALE, A. J. H. A review of microwave for food processing. **Food Technology**, Chicago: Institute of Food Technologists. P. 50-52, Dec. 1992.
- SÃO PAULO. Decreto nº 12.486, 20 out. 1978. Aprova normas técnicas especiais relativas a alimentos e bebidas. **Diário Oficial**, Estado de São Paulo, 21 out. 1978. 42p. [NTA-49].
- SCHIFFMANN, R. F. Microwave and dielectric drying. IN: MUJUNDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, 1987. p 327-356.
- SCHIFFMANN, R. F. Microwave Processing in the U. S. Food Industry. **Food Technology**, p. 50-52, 56, dec, 1992.

SENISE, J. T. A utilização de rádio frequência e microondas na eletrônica industrial. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 8, n.1, p. 51-61, jul./set. 1985.

SMIT, **Microondas**. Ed. Érica Ltda, 1987.

SMITH, F. J. Microwave- hot air drying of past, onions and bacon. **Microwave Energy Applications Newsletter**, vol. 12. n.6, p. 6-12, 1979.

TOLEDO, J. R. Pão lidera consumo na mesa do brasileiro. **Folha de São Paulo**, São Paulo, dez. 1997. p 6, Cad. 1.

VON HIPPEL, A. R. **Dielectrics and waves**, Cambridge: MIT, 1966. 284 p.

WALLACE, B.; VAN ARSDEL, B.S. Introduction, drying and driers. **Food Dehydration**. London: The Avi Publishing Company, INC., 1964. p. 1-131, Products and Technology,2.

Apêndice A

Tabela I : Propriedades Dielétricas de alguns Sólidos e Líquidos*						
Produto	T (°C)	m (%bu)	915 MHz		2450 MHz	
			ϵ'	$\tan \delta$	ϵ'	$\tan \delta$
Porcelana	25	-	8,93	9.10^{-4}	8,90	$1,1.10^{-3}$
Teflon	22	-	2,1	$1,4.10^{-4}$	2,1	$1,4.10^{-4}$
Vidro	25	-	3,85	$6,0.10^{-4}$	3,84	$6,8.10^{-4}$
Polietileno	23	-	2,26	$1,1.10^{-3}$	2,25	$1,2.10^{-3}$
Etanol	-	-	-	-	6,5	25.10^{-2}
Metanol	-	-	-	-	24	64.10^{-2}
Poliamida (Nailon)	25	-	3,06	$1,4.10^{-2}$	3,02	$1,2.10^{-2}$
Tetracloroeto de carbono	-	-	-	-	2,17	4.10^{-4}
Borracha Natural	25	-	2,85	$2,4.10^{-2}$	2,80	$1,8.10^{-2}$
Neoprene	25	-	-	-	4,0	$3,4.10^{-2}$
Água Destilada	25	-	77,5	$1,5.10^{-2}$	76,7	$15,7.10^{-2}$
Gelo Puro	-12	-	-	-	3,2	9.10^{-4}

Tabela II: Propriedades Dielétricas de alguns Alimentos*						
Produto	T (°C)	m (%bu)	915 MHz		2450 MHz	
			ϵ'	$\tan \delta$	ϵ'	$\tan \delta$
Carne cozida	20	68	-	-	41,6	0,31
Carne Crua	-20	74	-	-	4,6	0,11
Bife cru	-15	-	5,0	0,15	-	-
Carne gorda	-10	-	2,4	0,1	-	-
Óleo de milho	25	-	-	-	2,53	0,06
Óleo de soja	25	-	2,61	0,06	2,51	0,06
Manteiga	0	17	-	-	4,05	$9,6.10^{-2}$
Batata branca crua	25	81	70,3	0,37	62,9	0,27
Espinafre fervido	23	-	34,0	0,80	-	-
Trigo em grão	24	11	2,8	0,11	-	-
Semente de alfafa	24	4,9	-	-	2,6	0,05
Leite em pó	30	3,3	-	-	2,29	$2,1.10^{-2}$
Soro de leite em pó	30	4,8	-	-	2,04	$1,2.10^{-2}$
Macarrão	23	32,4	25,94	0,275	21,22	0,3629

* (METAXAS & MEREDITH, 1988), (NELSON, 1973), (NITZ, 1999), (RDRE, 1968).

Apêndice B

Determinação da Potência Disponível de Microondas em Forno Doméstico

O aquecimento de alimentos por microondas resulta do acoplamento de energia elétrica de um campo eletromagnético na cavidade de microondas e de sua dissipação dentro do produto. O movimento molecular decorrente produz uma elevação da temperatura. A taxa de elevação da temperatura é determinada pela potência absorvida bem como pelas propriedades físicas e térmicas da carga.

Para a medição da potência dos fornos de microondas, são adotados procedimentos baseados na medição da elevação de temperatura em cargas d'água padronizadas.

Para medir a potência do forno de microondas doméstico do modelo descrito no item 4.2.1, foram realizados testes seguindo a metodologia da *Commission Electrotechnique Internationale* – CEI – IEC 705. Foram feitas duas repetições para cada nível de potência oferecido pelo forno e comparados com as especificações do fabricante. A potência foi calculada segunda a equação:

$$P = [4,187 \times M_w \times (T_2 - T_1) + 0,55 \times M_c \times (T_2 - T_0)] / t$$

onde, P é a potência de saída do microondas em watts;

M_w é a massa de água em gramas;

M_c é a massa do recipiente em gramas;

T_0 é a temperatura ambiente em °C;

T_1 é a temperatura inicial da água em °C;

T_2 é a temperatura final da água em °C;

t é o tempo de aquecimento em segundos.

Antes de iniciar os testes foi feita uma leitura da voltagem nominal da rede. O uso de determinação de potência está limitado à calibração de equipamentos.

