

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO INTEGRADO DE
DESIDRATAÇÃO E MODIFICAÇÃO DA TEXTURA DE
BANANA (VAR. PRATA) POR SECAGEM CONVECTIVA E
PULSOS DE VÁCUO**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos da
Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito parcial à
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Alimentos.
Área de concentração:
Desenvolvimento de Processos da
Indústria de Alimentos

Orientador: Prof^o Dr. João Borges Laurindo

BARBARA DANIELE ALMEIDA PORCIUNCULA
Eng^a de Alimentos

Florianópolis, maio de 2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

P834d Porciuncula, Barbara Daniele Almeida
Desenvolvimento de processo integrado de desidratação e
modificação da textura de banana (Var. Prata) por secagem
convectiva e pulsos de vácuo [dissertação] / Barbara
Daniele Almeida Porciuncula ; orientador, João Borges
Laurindo. - Florianópolis, SC, 2010.
96 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos.

Inclui referências

1. Tecnologia de alimentos. 2. Engenharia de alimentos.
3. Banana. 4. Desidratação osmótica. 5. Secagem convectiva.
I. Laurindo, João Borges. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos. III. Título.

CDU 663

Dedico este trabalho aos meus pais (Loiva e Raul).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida e por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Borges Laurindo, pela orientação, paciência, confiança e pelo exemplo de profissional dedicado.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e sugestões.

Aos meus pais, Loiva e Raul, por serem simplesmente maravilhosos. Obrigada por acreditarem em mim! Obrigada por serem além de meus pais meus grandes amigos! A vocês não tenho como expressar meu amor e minha eterna gratidão!

Ao meu padrasto Wilson que mesmo distante sempre esteve presente! Wilson obrigada por estar em nossas vidas!

Aos meus colegas e amigos do PROFI, Jaque, Gustavo, Marieli, Vivian, Darlene, Fran, Kessi, Carmen, Fabinho, Thacy, Cris e Jaquinha. Agradeço a prestatividade de todos e muito obrigada pelos momentos agradáveis dentro e fora do laboratório.

Não tenho palavras para agradecer a Marta, que mais que uma colega de trabalho se tornou uma grande amiga e companheira de apartamento. Obrigada por me ouvir, obrigada por ter enxugado minhas lágrimas, obrigada pelas risadas, e muito obrigada pela paciência!

Aos professores do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos em especial a Prof. Alcilene pelo carinho e atenção.

Aos meus colegas de mestrado, Kelin, Marieli, Gilson, Gabriel, Caco, Luis, Thiago, Kátia, Dani, Silvia, Paty. As tardes de estudo não seriam as mesmas sem vocês! Obrigada!

A minha “pequena grande amiga” Kelin, com quem passei poucas e boas conhecendo Floripa!

As minhas queridas amigas “Helenas” de São Gabriel. Agradeço pelo carinho e pela torcida pela realização do meu mestrado. Em especial a Ana e a Bruna! Vocês são muito especiais!

Aos meus amigos de Rio Grande, Josi, João, André e Simone. Obrigada!

Meus colegas de FURG, Andréia, Walesca, Charlene, Marina, Vanessa, Vânia e ao Vitor e a sua família que sempre me recebeu como uma filha. A todos vocês obrigado.

A Família “Popô”, Tia Valderez, Tio Luis, Steph, Bruna e Lisi! Obrigada por acreditarem em mim e me apoiarem sempre! Lisi obrigada pelo exemplo!

Aos meus vizinhos e amigos, Luís Carlos (*in memoriun*), Lurdes, Marcel, Luciana, Mateus, Vanessa, Liziane e ao meu querido amigo irmão Vínicius! A todos vocês obrigada!

A secretária do CPGEA, Raquel, pela ajuda e atenção sempre que precisei.

As meninas do mercadinho Alternativo, pela simpatia e presteza.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

*“No fim tudo dá certo, se não deu certo é porque ainda não
chegou ao fim.”*

Fernando Sabino

RESUMO

A banana é uma fruta tropical de elevado valor nutricional. Segundo dados da FAO em 2007 o Brasil produziu 7 milhões de toneladas de banana. A alta perecibilidade dos frutos aliada à dificuldade de armazenamento nos meses de safra contribui para a perda em torno de 40% da produção nacional, gerando a necessidade do desenvolvimento de processos para sua preservação. Este trabalho teve como objetivo principal realizar um estudo comparativo de diferentes estratégias de desidratação para obtenção de banana desidratada com aparência e textura de qualidade superior. As frutas foram submetidas aos seguintes processos de desidratação: desidratação osmótica (DO), secagem convectiva, desidratação osmótica seguida de secagem convectiva e secagem por aplicação de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV). A desidratação osmótica ocorreu em solução de sacarose a 65°Brix e temperatura de 65°C, por 120 min. com proporção fruta:solução de 1:30. A secagem convectiva foi realizada em estufa com circulação forçada de ar a 60°C até peso constante. Na secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo as bananas, em fatias de ± 5mm, foram colocadas em uma câmara selada e aquecidas até 60°C. Atingida a temperatura, foi aplicado vácuo durante 5 minutos, após este período, a pressão do sistema foi restabelecida e as amostras foram aquecidas novamente, para aplicação de um novo ciclo de secagem. O cálculo do número de pulsos de vácuo aplicados na fruta foi determinado através da massa de água evaporada em cada ciclo, conforme a equação: $m_{\text{evap}} = (m_{\text{amostra}} \times c_p \times \Delta T) / \Delta H_{\text{vaporização}}$. A transferência de massa durante a DO foi caracterizada pela determinação dos parâmetros relativos à perda de massa (PM), perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS). A partir dos resultados obtidos, o tempo de processo selecionado foi de 2 horas, onde o valor de PA foi de 45,81%, o GS foi de 3,30% e a PM foi de 43,19%. Amostras *in natura* e previamente desidratadas osmoticamente submetidas à secagem convectiva apresentaram teores de umidade aceitáveis para frutas secas pela legislação brasileira (de 25% em base úmida), após 8 horas de processo. Após a secagem por CAPV, as amostras pré-tratadas osmoticamente e as secas a partir de frutas *in natura* apresentaram teores de umidade e atividade de água de 0,316g de água/g de sólidos secos 0,429 e 0,293g de água/g de sólidos secos e 0,277, respectivamente. Para ambas as amostras o tempo de processo foi de aproximadamente 2,6 horas. Além da redução do período de secagem,

se comparado com a secagem convectiva, a secagem por CAPV possibilitou a obtenção de frutas com baixos teores de umidade e atividade de água. Ensaios mecânicos realizados para as amostras secas por CAPV apresentaram curvas de força x deformação relativa “ruidosas”, ou seja, com a presença de diversos picos, característico de materiais crocantes. As amostras secas convectivamente apresentaram curvas suaves, resultado do colapso da estrutura da amostra. As diferenças estruturais das amostras secas pelos diferentes processos puderam ser verificadas pela análise de microscopia eletrônica de varredura, onde nas bananas secas por CAPV foi possível observar a matriz porosa formada, semelhante à de bananas comerciais liofilizadas. Deste modo, este trabalho apresenta resultados que podem ser de grande utilidade para o aproveitamento industrial e agregação de valor às bananas.

Palavras chave: banana, desidratação osmótica, secagem convectiva, secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

ABSTRACT

Banana is a tropical fruit with high nutritional value. According to data from FAO Brazil was produced 7 million tons of bananas in 2007. The highly perishable fruit allied to the difficulty of storage in the harvesting season contributes to the loss of around 40% of national production. Considering this fact, It is important to improve the techniques of conservation and processing. The main goal of this work is to compare different strategies of drying to obtain a high quality dried banana. Fruits were dried through osmotic dehydration (OD), convective drying (CD), and osmotic dehydration followed by successive cycles of heating-and-puffing dry (multi-puff-drying - MPD). The OD process conditions were sucrose solution at a concentration of 65°Brix under 30°C with a solution:sample mass relation of 30:1 for 120 minutes. The convective drying consisted in drying the samples at 60°C in a forced air drier until constant weight. The MPD drying consisted of storing the bananas in a jacketed container. The samples were heated up to 60°C and then they were maintained under vacuum during 5 minutes, which consisted of a cycle. The number of cycles were estimated by considering that the flash evaporation is an isoenthalpic process, i.e., $m_{\text{evap}} = (m_{\text{sample}} \times c_p \times \Delta T) / \Delta H_{\text{vaporization}}$. The mass transport during OD was characterized by the determination of sample mass loss (ML), water loss (WL), and sugar gain (SG). At 120 minutes after the beginning of the processing, it was observed 45% of WL, 43% of ML and 3% of SG of the sample. Brazilian legislation stipulates, for dried fruits, a moisture content (W_{wb}) of 25%. Dried samples from fresh banana and pretreatment samples by OD present much moisture content after 8 hours in convective drying. In the other hand, dried samples from fresh banana presented, $W_{\text{db}} = 0.316$ g water/g dry solids and water activity (A_w) 0.429 after 12 cycles. For pretreatment samples by OD, the $W_{\text{db}} = 0.293$ g water/g dry solids and $A_w = 0.277$. For both samples the process time were nearly 2.6 hours. In the spite of the reduction of the drying period, MPD drying resulted in a final product with low moisture content and water activity in the end of the drying process. Strain-force curves from mechanical measurements of puncture tests showed, many peaks (jagged curve), characteristics of crunch and crispy foods for dried samples by MPD. On the contrary, samples dehydrated by convective drying showed smooth curves, as a result of the collapse of fruit structure. Analysis of sample images using scanning electron microscopy (SEM) showed the structural differences of the samples

dried by different methods, where in the images from dried banana by MPD it was possible verify the porous matrix formed, similar to commercial freeze-dried bananas. Thus, this work presents results that has potential industrial uses and may add value to dry banana products.

Keywords: banana, osmotic dehydration, convective drying, multi-puff-drying.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.1- Banana (Musa ssp.).....	5
1.1.1 Produção.....	5
1.1.2 - Banana Prata (Musa sapientum L.).....	7
1.2 - Banana Passa.....	8
1.3 - Desidratação de Alimentos.....	10
1.3.1- Desidratação Osmótica.....	10
1.3.2 - Secagem Convectiva.....	13
1.3.3 - Secagem Solar.....	15
1.3.4 - Liofilização.....	15
1.3.5-Fritura.....	16
1.3.6-Puff-drying.....	17
1.4 - Qualidade do Produto Final.....	18
1.4.1 - Atividade de Água e Teor de Umidade	18
1.4.2 -Textura.....	19
1.4.3 -Crocância.....	21
1.4.4- Capacidade de Reidratação.....	23
1.5 – Modelos de Transferência de Massa.....	24
1.5.1 Placa Plana Infinita.....	25
1.5.2 Cilindro Infinito.....	28
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
2.1. Preparo das Amostras.....	31
2.2 Determinações das Propriedades Físico- Químicas das Frutas In natura.....	32
2.3 Avaliação de Alternativas de Processo para Produção de Frutas Desidratadas.....	33
2.4 Desidratação Osmótica.....	34
2.4.1 Preparo das soluções de sacarose.....	34
2.4.2 Equipamentos utilizados da desidratação osmótica (DO).....	34
2.4.3 Determinação dos parâmetros perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de massa (PM).....	35
2.4.4 Determinação da difusividade da água na banana.....	36
2.5 Secagem Convectiva.....	38
2.5.1 Modelagem Matemática das Curvas de Secagem.....	39

2.6 Dispositivo Experimental para a Aplicação da Secagem por Ciclos de Aquecimento-Pulso de Vácuo (Multi-Puff-Drying)	41
2.6.1 <i>Fundamentação Teórica da Secagem por Sucessivos Ciclos de Aquecimento-Pulso de Vácuo (Multi-puff-drying)</i>	42
2.6.2 <i>Testes Preliminares</i>	44
2.6.3 <i>Determinação do Número de Pulsos</i>	44
2.6.4 <i>Procedimento Experimental da Aplicação de Ciclos de Aquecimento-Pulso de Vácuo (Multi-Puff-Drying)</i>	46
2.7 Determinação dos Parâmetros de Qualidade do Produto Final	47
2.7.1 <i>Teor de umidade e atividade de Água</i>	47
2.7.2 <i>Determinação das Propriedades Mecânicas</i>	47
2.7.3 <i>Capacidade de Reidratação</i>	48
2.7.3.1 <i>Modelagem Matemática das Curvas da Capacidade de Reidratação</i>	48
2.8 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	48
2.9 <i>Testes realizados em amostras desidratadas comerciais</i>	49
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1 <i>Propriedades Físico- Químicas das Bananas Prata (Musa sapientum L)</i>	52
3.2 <i>Desidratação Osmótica</i>	53
3.3 <i>Secagem Convectiva</i>	59
3.4 <i>Resultados Preliminares da Secagem por Ciclos de Aquecimento- Pulso de Vácuo (Multi-puff-drying)</i>	68
3.5 <i>Secagem por Ciclos de Aquecimento-Pulso de Vácuo (Multi-puff-drying) de banana in natura (sem pré-tratamento osmótico)</i>	70
3.6 <i>Secagem por Ciclos sucessivos de Aquecimento-Pulso de Vácuo (Multi-puff-drying) de banana previamente desidratada</i>	79
CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 1.1 -	Evolução da produção de banana no Brasil entre os anos de 1997 e 2007.....	6
Figura 1.2 -	Fotografia de uma penca de Banana Prata.....	7
Figura 1.3 -	Evolução da coloração amarela da casca de banana durante o amadurecimento (MEDINA e PEREIRA, 2004).....	9
Figura 1.4 -	Transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica.....	11
Figura 1.5 -	Mudanças estruturais ocorridas na célula vegetal durante a desidratação osmótica (MAYOR et al., 2008).....	12
Figura 1.6 -	Curvas típicas de secagem (Park et al. 2001).....	14
Figura 1.7 -	Mecanismo do <i>puffing</i> antecedido de secagem (VARNALLIS et al.,2001).....	18
Figura 1.8 -	Curvas de força-deformação relativa de amostras de cereais matinais submetidas a ensaios de mecânicos (LAURINDO e PELEG, 2007).....	22
Figura 1.9 -	Ilustração da geometria da placa plana infinita..	26
Figura 1.10 -	Ilustração da geometria de um cilindro infinito..	28

CAPÍTULO II - MATERIAS E MÉTODOS

Figura 2.1 -	Dispositivo utilizado para os cortes de bananas.....	32
Figura 2.2 -	Representação dos diâmetros e do comprimento medidos nas bananas <i>in natura</i>	32
Figura 2.3 -	Fluxograma esquemático das diferentes técnicas de secagem avaliadas para a obtenção de frutas desidratadas.....	33
Figura 2.4 -	Dispositivo experimental utilizado para estudos da desidratação osmótica das amostras de frutas.....	35

Figura 2.5 -	Representação do algoritmo utilizado para estimativa dos valores de D_{ef} da água nas amostras de banana para cada intervalo de tempo.....	37
Figura 2.6 -	Estufa com Circulação e Renovação de Ar.....	39
Figura 2.7 -	Diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para aplicação dos pulsos de vácuo.....	42
Figura 2.8 -	Algoritmo utilizado para o cálculo do decréscimo de massa teórico de bananas submetidas à secagem por ciclos aquecimento-pulso de vácuo.....	45
Figura 2.9 -	Amostras de bananas acondicionadas antes da aplicação da secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	49
Figura 2.10 -	Demonstração da localização das perfurações durante os testes mecânicos.....	47

CAPÍTULO III – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 3.1 -	Cinética da perda de água (PA), ganho de sólidos (GS), e perda de massa (PM) na desidratação osmótica de banana. Condições de ensaio: 60°C e concentração da solução de 65°Brix, relação fruta:solução 1:30.....	53
Figura 3.2 -	Curva da atividade de água (A_w) em função do tempo de contato fruta solução osmótica.....	55
Figura 3.3 -	Coefficiente de difusão efetiva da água nas amostras de banana submetidas à desidratação osmótica em solução osmótica a 65°Brix e 65°C em função da concentração de umidade adimensional.....	56
Figura 3.4 -	Ajuste dos dados da concentração adimensional da umidade de bananas tratadas osmoticamente ao modelo difusional baseado no menor, no maior e no valor mediano do coeficiente de difusão em função do tempo.....	57

Figura 3.5 -	Ajuste dos dados da cinética de desidratação osmótica de banana em solução a 65°Brix e 65°C, desconsiderando o encolhimento das amostras durante o processamento.....	59
Figura 3.6 -	Curva de secagem das bananas prata submetidas à desidratação osmótica e <i>in natura</i> , secas em estufa com renovação e circulação de ar a 60°C.....	60
Figura 3.7 -	Fotografia de amostras de bananas: (a) sem pré-tratamento secas convectivamente (b) previamente desidratadas secas convectivamente.....	61
Figura 3.8 -	Curva da taxa de secagem das amostras de bananas previamente desidratadas e <i>in natura</i> submetidas à secagem em estufa com circulação e renovação de ar a 60°C.....	62
Figura 3.9 -	Cinética da secagem de bananas prata submetidas à desidratação osmótica e <i>in natura</i> ajustados pelos modelos empíricos de Page e Peleg.....	64
Figura 3.10 -	Curva de atividade de água para a banana em função do tempo de secagem a 60°C e UR= 12%.....	65
Figura 3.11 -	Capacidade de reidratação das amostras de banana <i>in natura</i> e amostras de banana pré desidratadas secas em estufa com circulação e renovação do ar a 60°C.....	66
Figura 3.12 -	Curva típica força deformação de bananas <i>in natura</i> e pré-desidratadas osmoticamente secas em estufa com renovação e circulação do ar para testes de penetração.....	68
Figura 3.13 -	Curva de pressão e temperatura para a secagem de banana <i>in natura</i> submetida aos ciclos de aquecimento pulsos de vácuo (■) pressão (mbar), (◆) temperatura (°C).....	71
Figura 3.14 -	(a) amostra de banana desidratada comercial, (b) amostra de banana desidratada pelo processo de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	72

Figura 3.15 -	Efeito da aplicação dos ciclos de aquecimento pulsos de vácuo na umidade das amostras de banana <i>in natura</i>	72
Figura 3.16 -	Efeito da aplicação dos ciclos de aquecimento pulsos de vácuo na atividade de água das amostras de banana.....	73
Figura 3.17 -	Curva típica força deformação para bananas secas por ciclos de aquecimento pulsos de vácuo.....	74
Figura 3.18 -	MEV de amostras de bananas comerciais liofilizadas (1), amostras de banana <i>in natura</i> secas por ciclos de aquecimento pulsos de vácuo (2) e amostras de banana <i>in natura</i> secas convectivamente a 60°C (3). (a) indica fratura da amostra e (b) parte superior da amostra exposta ao ar de secagem.....	75
Figura 3.19 -	Capacidade de reidratação das amostras de banana <i>in natura</i> secas por CAPV e amostras de banana comercial liofilizada.....	76
Figura 3.20 -	Efeito da aplicação dos pulsos de vácuo no calor específico teórico das amostras de banana <i>in natura</i>	77
Figura 3.21 -	Perdas de massa teórica e experimental encontradas durante a aplicação dos pulsos de vácuo em bananas <i>in natura</i>	78
Figura 3.22 -	Curva de pressão e temperatura para a secagem de banana desidratada osmoticamente submetida aos ciclos de aquecimento pulsos de vácuo (■) pressão (mbar), (◆) temperatura (°C).....	79
Figura 3.23 -	Efeito da aplicação dos ciclos de aquecimento pulsos de vácuo na umidade das amostras de banana previamente desidratadas.....	80
Figura 3.24 -	Efeito da aplicação dos ciclos de aquecimento pulsos de vácuo na atividade de água das amostras de banana previamente desidratadas.....	81

Figura 3.25 -	Curva típica força deformação para bananas pré-desidratadas por DO e bananas obtidas de frutas in natura secas por ciclos de aquecimento pulsos de vácuo.....	81
Figura 3.26 -	Capacidade de reidratação das amostras de bananas previamente desidratadas osmoticamente secas por CAPV e secas convectivamente.....	82

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 1.1 -	Composição química aproximada da banana prata madura.....	8
Tabela 1.2 -	Raízes de $J_0(\gamma_n)=0$	29

CAPÍTULO II - MATERIAS E MÉTODOS

Tabela 2.1 -	Composição química aproximada da banana <i>in natura</i>	45
---------------------	--	----

CAPÍTULO III – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 3.1 -	Caracterização físico-química das amostras de banana prata <i>in natura</i>	52
Tabela 3.2 -	Erro médio quadrático percentual (%MSE) para o modelo difusivo fixando o maior, o menor e o valor mediano para o coeficiente de difusão.....	58
Tabela 3.3 -	Resultados dos ajustes dos modelos de Page e do modelo de Peleg na secagem de banana.....	63
Tabela 3.4 -	Resultados do ajuste do modelo de Peleg na capacidade de reidratação de bananas secas.....	67
Tabela 3.5 -	Parâmetros de qualidade para diferentes espessuras de banana prata.....	69
Tabela 3.6 -	Comparação entre os parâmetros de qualidade das amostras de banana <i>in natura</i> com relação às entradas de ar.....	70
Tabela 3.7 -	Resultados do ajuste do modelo de Peleg na reidratação das amostras de banana.....	77
Tabela 3.8 -	Resultados do ajuste do modelo de Peleg na reidratação das amostras de banana previamente desidratadas por DO e secas por diferentes processos.....	83

INTRODUÇÃO

A banana é uma importante fonte na alimentação humana, pelo valor energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que apresenta (LIMA et al., 2000). Na safra mundial de 2006-2007, o cultivo da banana foi de 4,4 milhões de hectares, com quantidade produzida de 81,2 milhões de toneladas e rendimento médio de 18,425 toneladas/ hectare. A área colhida cresceu 0,77%, a produção aumentou 1,54% e o ganho de produtividade 0,76% em comparação com os dados da safra anterior 2005-2006.(EPAGRI, 2008).

A alta perecibilidade dos frutos, aliada a dificuldades de armazenamento nos meses de safra contribui para uma perda em torno de 40% da produção nacional, gerando a necessidade do desenvolvimento de processos para sua utilização e preservação (SOUSA et al., 2003).

Uma das técnicas de preservação de alimentos mais antigas utilizadas pelo homem consiste na remoção de umidade dos alimentos pelo processo de secagem. A remoção de umidade provoca diminuição da atividade de água do produto, inibindo o desenvolvimento de micro-organismos e retardando deteriorações de origem físico-química (CANO-CHAUCA et al., 2004). A fruta seca é o produto obtido pela perda parcial da água da fruta madura inteira ou em pedaços, atingindo-se um teor de umidade final que varia entre 15 e 25%. Nesse processo, normalmente ocorrem mudanças significativas na cor, sabor e textura do produto desidratado, quando comparado com a fruta fresca da qual se originam (MOTA, 2005).

A demanda por alimentos processados que mantenham características mais próximas possíveis dos produtos originais tem aumentado sensivelmente nas últimas duas décadas. No que se refere ao processamento industrial, seja em grande ou pequena escala, há necessidade de desenvolver tecnologias que contribuam para

Introdução

minimizar os efeitos adversos provocados nos alimentos pelo processamento. Esse é o caso das frutas desidratadas utilizadas para consumo imediato ou como ingredientes na formulação de diversos tipos de alimentos, tais como em produtos de confeitaria, sorvetes, sobremesas congeladas, saladas de frutas e iogurtes. Em todos esses casos é desejável que os ingredientes mantenham a cor, o aroma e o sabor o mais próximo da fruta *in natura*, preferencialmente sem a utilização de aditivos, e proporcionando uma textura agradável ao alimento depois do processamento. A associação de operações e processos adequados durante a fabricação de determinado alimento pode garantir a manutenção dessas qualidades no produto final (DIONELLO et al., 2009).

Vários processos tecnológicos têm sido explorados em escala industrial para preservar frutas e hortaliças, e os métodos mais antigos incluem secagem, enlatamento, preservação química e refrigeração/congelamento. O uso de métodos de preservação física (aquecimento, congelamento, desidratação e embalagem) e os métodos químicos (pH e conservantes) continuam a ser usados extensivamente e, por isso, avanços tecnológicos para melhorar a eficiência e eficácia desses processos estão sempre em desenvolvimento. Esses processos têm em comum o objetivo de estender a vida de prateleira dos alimentos para permitir um armazenamento e uma distribuição adequados (HOFSETZ, 2005).

O processo de desidratação osmótica, que consiste na imersão do produto em soluções concentradas de açúcar e sal, promove a remoção parcial da água e a possível incorporação de solutos no alimento. Esse processo também pode ser utilizado com o objetivo de modificar a composição dos alimentos, permitindo a adição de ingredientes de interesse nutricional, sensorial ou de preservação. No processo de desidratação osmótica são obtidas frutas de alta umidade (sendo, portanto um pré-processamento), de boa qualidade nutricional, com a preservação do sabor e de outras propriedades sensoriais e com características similares ao produto fresco (ITO et al., 2007).

Alguns estudos com frutas e hortaliças mostram que a secagem com ar quente não fornece produtos de boa qualidade, principalmente devido ao prolongado tempo de secagem, o que afeta as características de cor, textura e volume do produto final (RATTI, 2001).

Objetivos do Trabalho

Este trabalho teve como objetivo principal realizar um estudo comparativo de diferentes estratégias de desidratação para obtenção de frutas desidratadas de qualidade superior.

Os objetivos específicos foram:

- a) Montar um dispositivo experimental para o estudo da secagem por aplicação de ciclos de aquecimento- pulso de vácuo;
- b) Estudar a cinética da desidratação osmótica;
- c) Estudar a cinética da secagem convectiva das frutas *in natura* e das frutas pré- desidratadas osmoticamente;
- d) Estudar a cinética da secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo das frutas *in natura* e das frutas pré- desidratadas;
- e) Analisar os parâmetros de qualidade do produto seco obtidos pelas diferentes técnicas de secagem.

Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica, abordando os assuntos referentes à produção da matéria-prima utilizada e as diferentes técnicas de desidratação e os parâmetros de qualidade do produto desidratado, como o teor de umidade e a atividade de água e as propriedades de textura, como a crocância. O segundo capítulo, referente aos materiais e métodos utilizados, descreve com detalhes a montagem dos dispositivos experimentais utilizados nos ensaios, bem como as metodologias utilizadas nos processos de desidratação, incluindo os cálculos dos parâmetros de interesse. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos no terceiro capítulo. As seções seguintes apresentam as conclusões e as referências bibliográficas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo foi dividido em tópicos. No primeiro tópico será apresentada uma breve revisão sobre a produção da matéria prima utilizada nesse trabalho e sobre a banana da variedade Prata. O segundo tópico aborda as diferentes técnicas de desidratação utilizadas para a obtenção de banana desidratada com diferentes texturas. No terceiro e último tópico serão apresentados os parâmetros de identificação da qualidade do produto desidratado, como o teor de umidade final e a atividade de água, assim como as propriedades de textura.

1.1 Banana (Musa ssp.)

1.1.1 Produção

A banana (*Musa ssp.*) é uma das frutas mais consumidas no mundo, sendo explorada na maioria dos países tropicais (ALVES, 1999). Segundo dados da FAO, em 2007 a produção mundial de bananas chegou a 85 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 8% desta produção. A figura 1.1 demonstra o comportamento da produção brasileira de banana nos últimos 10 anos, segundo dados da FAOSTAT (2007). Entre os anos de 1997 e 2007, a produção brasileira sofreu um aumento de aproximadamente 23%.

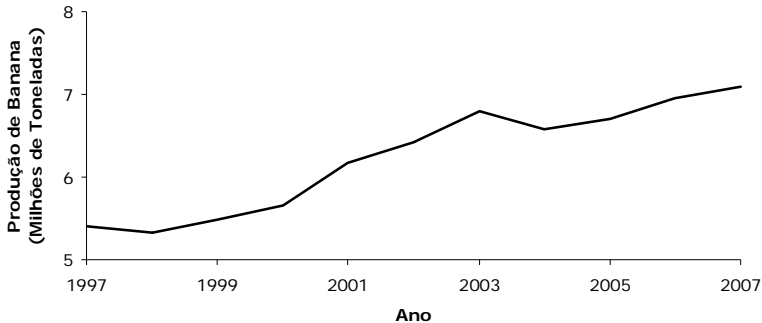


Figura 1.1- Evolução da produção de banana no Brasil entre os anos de 1997 e 2007.

Depois da laranja, a banana é a fruteira mais plantada no Brasil. Além do expressivo volume produzido e da área ocupada, a banana também é de suma importância no cenário nacional, por estar presente na mesa da maioria dos consumidores. O mercado nacional é o 12º maior consumidor mundial dessa fruta. Segundo a FAO, em 2005 o consumo nacional de banana alcançou 29,2 kg/ habitante/ ano. A banana faz parte dos hábitos alimentares das populações mais carentes, devido a seu baixo custo e alta disponibilidade de calorias (870 kcal/1000g). A banana é uma boa fonte de minerais como potássio e magnésio (WALL, 2006).

As exportações de banana são pouco expressivas em relação ao consumo interno. Os Estados das Regiões Sul e Sudeste vendem a maior parte de suas produções para os países do MERCOSUL, principalmente para os mercados argentino e uruguaio, enquanto os estados do nordeste, especialmente o Rio Grande do Norte e o Ceará, têm tido a participação crescente no mercado da Europa.

O Estado da Bahia se destaca no cenário nacional como o maior produtor de banana. Na safra de 2007-2008 foi responsável por 20,3% do total produzido, seguido pelo Estado de São Paulo, com 17,5%; Santa Catarina, com 8,3%; Pará, com 8,0%; Minas Gerais, com 7,7%; Ceará, com 6,1% e Pernambuco, com 5,9% (EPAGRI-SC, 2009). Esses estados, juntos, perfazem 73,8% do volume total produzido.

1.1.2 Banana Prata (*Musa sapientum* L.)

A banana Prata foi introduzida no Brasil pelos portugueses, e por essa razão os brasileiros, especialmente os nordestinos e nortistas, manifestam uma clara e constante preferência pelo seu sabor. Essa variedade apresenta frutos pequenos, de sabor doce e suavemente ácido (SEBASTIÃO et al. 2004). São frutos de seção transversal pentagonal, com cinco quinanas bem visíveis, de tamanho médio, com 10 a 13 cm de comprimento e 3,5 a 4 cm de diâmetro, com extremidade bem anunciada, pontuda, sem restos florais (MEDINA, et al., 1995). A casca do fruto é fina, de cor amarelo-esverdeada, a polpa é creme-rósea-pálida, excelente para o consumo *in natura* (MANICA, 1997).



Figura 1.2- Fotografia de uma penca de Banana Prata.

A composição química geral da porção comestível da banana prata, com ênfase em seu valor nutricional, está apresentada na tabela 1.1, segundo alguns dados reportados na literatura (MEDINA et al., 1995; NEPA, 2006).

Tabela 1.1: Composição química aproximada da banana prata madura.

Constituinte	Referências	
	Medina et al., 1995*	NEPA, 2006**
Umidade (%)	73,79	71,9
Amido (%)	2,91	--
Açúcares Totais (%)	20,58	--
Lipídios (%)	0,13	0,1
Proteínas (%)	1,43	1,3
Fibras (%)	0,21	2
Cinzas (%)	0,84	0,8

* em 100g de polpa madura fresca

** em 100g da fruta madura

Segundo Medina e colaboradores (1995), a alteração mais perceptível em relação à maturação da banana, que ocorre na polpa, é a transformação do amido em açúcares. A banana verde contém um alto teor de amido (cerca de 20%) que, durante a maturação, se converte, através das amilases, em açúcares. A porcentagem de amido na banana completamente madura é bem mais baixa, situando-se em torno de 0,5% a 2%.

1.2 Banana Passa

Segundo a resolução- CNNPA (Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos) n°12, 1978, a banana passa é um produto obtido pela eliminação parcial da água da fruta madura, inteira ou em pedaços, por processos tecnológicos adequados. O produto deve ser processado com frutas sãs e limpas, isentas de matéria terrosa, parasitas e de detritos animais e vegetais. Não deve conter substâncias estranhas à sua composição normal, ou mesmo apresentar fermentações, que indicariam produto em decomposição. O único controle físico-químico estabelecido é o teor de umidade, que deve ser no máximo igual a 25%p/p.

Geralmente são utilizadas as bananas dos tipos nanica ou nanição. O produto obtido é de coloração escura, consistência firme e sabor pouco persistente de banana (LIMA et.al, 2000). A banana seca ou banana passa caracteriza-se por um elevado teor de açúcares. Pode ser

Revisão Bibliográfica

classificada entre os produtos de elevado valor alimentício, facilmente assimilável e constituindo uma fonte de calorias (MEDINA et al., 1995).

Apesar da fabricação desse produto ser importante, com o objetivo de reduzir perdas e agregar valor, a escolha da matéria-prima é importante, pois dela vai depender a qualidade do produto final (MEDINA et al. 1995). É adotada uma escala de coloração da casca como indicativo de maturação dos frutos: 1) totalmente verde; 2) verde com traços amarelos; 3) mais verde do que amarelo; 4) mais amarelo do que verde; 5) amarelo com ponta verde; 6) totalmente amarelo; 7) amarelo com manchas marrons (MEDINA e PEREIRA, 2004). As amostras utilizadas para a produção de banana passa devem possuir amadurecimento adequado, uniforme e com nível de maturação 7 (MEDINA et al. 1995). Essa escala é ilustrada na figura 1.3.

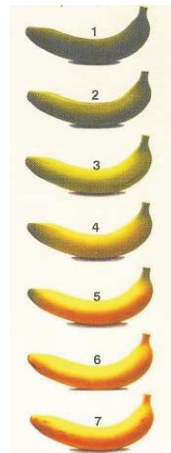


Figura 1.3- Evolução da coloração amarela da casca de banana durante o amadurecimento (MEDINA e PEREIRA, 2004).

A secagem mais comumente utilizada pela indústria é por meio do ar quente, em secadores tipo túnel. A temperatura ideal de secagem, tendo em conta os fatores qualidade, cor do produto, velocidade de secagem e condições atmosféricas ambientais, é 70°C. O tempo de secagem é de cerca de 12 a 16 horas, quando a umidade relativa exterior se situa entre 70 a 90%.

1.3 Desidratação de Alimentos

A desidratação é uma das técnicas mais antigas utilizada na preservação de alimentos, com a função principal de promover sua estabilidade microbiológica, inibindo o crescimento microbiano através da redução da atividade de água, ao mesmo tempo em que diminui o peso do alimento, garantindo economia e praticidade em seu armazenamento e transporte (TOREZAN, 2005). Apresentam-se a seguir algumas técnicas de desidratação.

1.3.1 Desidratação Osmótica

É uma operação utilizada para a remoção parcial da água de tecidos celulares, através da imersão do produto inteiro ou em pedaços em soluções aquosas hipertônicas (soluções osmóticas) de um ou mais solutos (RASTOGI et al., 2005). Durante o processo de desidratação osmótica, a estrutura celular atua como uma membrana semipermeável (SHI e FITO, 1994).

A desidratação osmótica tem se apresentado como uma prática tecnológica para se desenvolver produtos derivados de frutas com valor agregado e com propriedades funcionais (TORREGGIANI e BERTOLO, 2001). Diferentes estudos têm sido realizados sobre o uso de processos osmóticos para obtenção de diferentes tipos de produtos de frutas ou ingredientes alimentares, como minimamente processados ou frutos com umidade intermediária. A desidratação osmótica é usada como um pré-tratamento para muitos processos para melhorar a nutrição, propriedades sensoriais e funcionais dos alimentos, sem alterar sua integridade (TORREGGIANI, 1993). Geralmente a desidratação osmótica é utilizada como uma etapa anterior ao processo de secagem convectiva (NOWAKUNDA et. al, 2004), liofilização (AGNIESZKA e ANDRZEJ, 2010), secagem por microondas e secagem a vácuo.

Na figura 1.4 está apresentada a transferência de massa durante a desidratação osmótica. Dois principais fluxos em contra-corrente são estabelecidos simultaneamente, a saída de água para a solução e a transferência de solutos para o produto. Há ainda um terceiro processo

Revisão Bibliográfica

de transferência, a lixiviação dos solutos do produto (açúcares, ácidos, minerais e vitaminas) para a solução.

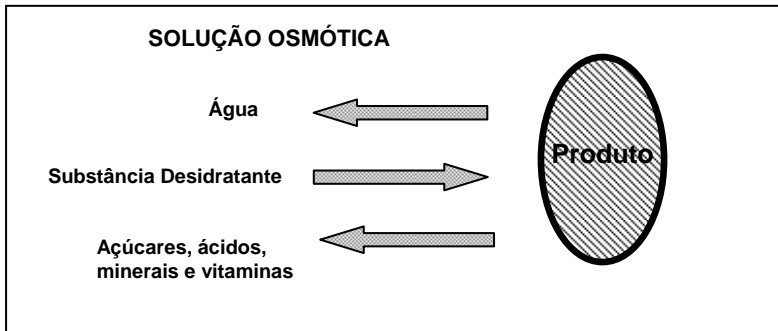


Figura 1.4- Transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica.

Além das alterações químicas provocadas nas frutas, a desidratação osmótica provoca alteração das propriedades físicas dos tecidos vegetais. Encolhimento, diminuição da capacidade de retenção de água, alterações na porosidade e na resistência à deformação são usualmente observados durante a desidratação osmótica (LEWICKI e PORZECKA-PAWLAK, 2005). A desidratação osmótica aumenta a relação açúcar/ácido, modificando a textura do produto e a estabilidade dos pigmentos durante a desidratação e armazenamento de alimentos (RAOULT-WACK, 1994). Por ser efetuada à temperatura ambiente, minimiza danos térmicos à textura, cor e sabor.

Quando o tecido vegetal é colocado em uma solução hipertônica, a água sai da célula por osmose. Como resultado, o vacúolo e o resto do protoplasma diminuem, fazendo com que a membrana plasmática se afaste da parede celular. Esse fenômeno é conhecido como plasmólise (Fig. 1.5b). A plasmólise é acompanhada de uma perda da pressão de turgor, encolhimento e deformação das células (parede celular e membrana plasmática), e concentração da fase líquida do protoplasma. Outro fenômeno que pode ser observado durante a desidratação é o descolamento da lamela média (Fig. 1.5c). Este fenômeno é provavelmente devido à desnaturação ou degradação dos componentes da lamela média ou pelos “microstresses” produzidos no tecido celular devido à remoção da água. Esse fenômeno tem uma

Revisão Bibliográfica

influência sobre as propriedades mecânicas do produto, bem como na porosidade do material, pois são formados espaços intercelulares. Outro fenômeno que pode ocorrer é a ruptura da parede celular, levando à formação de poros que conectam o interior da célula com a solução osmótica (Fig. 1.5d) (MAYOR et al., 2008).

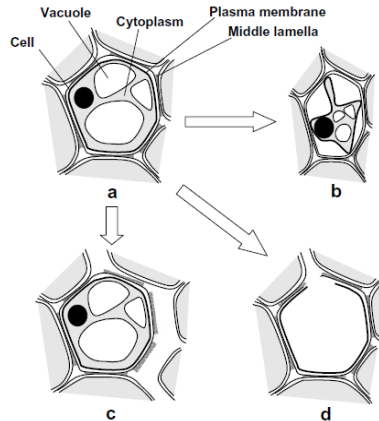


Figura 1.5- Mudanças estruturais ocorridas na célula vegetal durante a desidratação osmótica (MAYOR et al., 2008).

A quantidade e a taxa de transferência de água dos tecidos da fruta para a solução durante a desidratação osmótica dependem de muitas variáveis, como a concentração, a composição química e a temperatura da solução, o tipo de fruta, sua geometria, o tempo de contato entre a fruta e a solução e a agitação do sistema (SHI e FITO, 1995).

Sousa e colaboradores (2003) estudaram a influência da concentração da solução osmótica nas características químicas e físico-químicas de bananas prata. Foram utilizadas soluções de sacarose com concentrações de 45°Brix, 55°Brix e 65°Brix. Eles observaram que durante a desidratação osmótica há uma influência do xarope osmótico sobre a redução da umidade e da atividade de água, sendo diretamente proporcional à elevação da concentração do mesmo.

A influência da agitação, da temperatura e da composição da solução sobre a perda de água e a incorporação de sacarose e cloreto de sódio no tomate foi estudada por Tonon e colaboradores (2006). Todas as respostas analisadas foram influenciadas positivamente pela temperatura e pela composição da solução osmótica. A agitação apresentou efeito positivo sobre a perda de água, mas não sobre a

Revisão Bibliográfica

incorporação de sal e de sacarose, o que sugere que o processo de transferência de água não é controlado apenas internamente e que a condição de resistência externa à transferência de massa desprezível, adotada na maioria das soluções da Segunda Lei de Fick, não pode ser considerada neste caso. Já o transporte dos solutos, ao contrário, parece ser governado predominantemente por um mecanismo interno, uma vez que não sofre influência do nível de agitação do processo.

Os principais agentes osmóticos utilizados para frutas são a sacarose, a frutose, a glicose, xarope de milho e para legumes normalmente utiliza-se o cloreto de sódio (LENART, 1996). No Brasil, a ampla disponibilidade de açúcar-de-cana, coloca esse agente osmótico como o principal para uso em processos de desidratação osmótica de alimentos (FALCONE & SUAZO, 1988). Além disso, é considerada uma das melhores substâncias osmóticas, principalmente quando a desidratação é utilizada como pré-tratamento para a secagem. A presença deste açúcar na superfície da amostra desidratada é um obstáculo para o contato com o oxigênio, reduzindo as reações oxidativas (CÓRDOVA, 2006). Além desta vantagem, a sacarose preserva o aroma das frutas desidratadas e apresenta custo mais baixo quando comparado com outros solutos.

1.3.2 Secagem Convectiva

A técnica de secagem tem sido amplamente utilizada na preservação de alimentos, reduzindo o teor de umidade tem-se uma redução da atividade microbiana e conseqüentemente um aumento na vida útil do produto (KATEKAWA e SILVA, 2007).

O processo de secagem não afeta apenas o teor de água, mas também as características físicas, químicas e biológicas do alimento, tais como a atividade enzimática, deterioração microbiana, textura, viscosidade, aroma, gosto e sabor dos alimentos (BARBOSA-CÁNOVAS, 2000). Durante o processo de secagem ocorre transferência simultânea de calor e massa (STRUMILLO et al. 1986). A eliminação de água é geralmente acompanhada por um fenômeno de encolhimento do matriz sólida, que deforma seriamente o produto final (LOUKA et al., 2004). Mayor (2005) observou que durante o processo de secagem de fatias de maçã em estufa a 70°C houve uma contração da célula e dos espaços intercelulares.

Na figura 1.6 estão representadas uma curva típica de secagem, a curva da taxa de secagem, obtida da primeira e a evolução da temperatura do produto durante o processo.

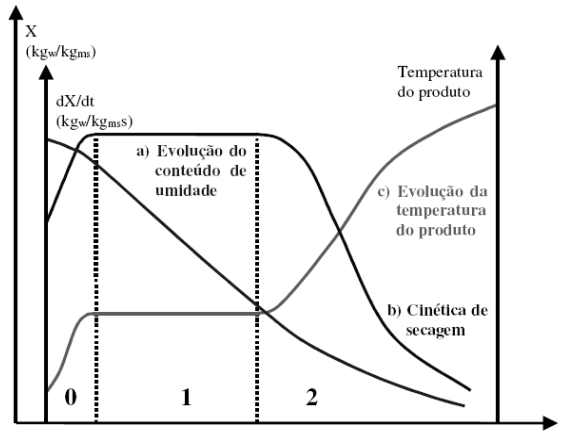


Figura 1.6- Curvas típicas de secagem (Park et al. 2001).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, teor de umidade do produto em base seca (X), em relação à evolução do tempo de secagem (t), isto é, é a curva obtida pesando o produto durante a secagem, à dadas condições de secagem. A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do teor de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação ao tempo (t) de processo, isto é, é a curva obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo t), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK et al. 2001).

A operação de secagem ocorre em 3 etapas. Na primeira, denominada de período zero (fase de acomodação antes do primeiro período de secagem), a taxa de secagem é alta, pois a superfície do produto está mais fria que o ar e, portanto, sua temperatura eleva-se rapidamente. Numa segunda etapa, definida como primeiro período de secagem, a remoção de umidade se dá à taxa constante porque a umidade interna do produto é transportada para a superfície na mesma

Revisão Bibliográfica

velocidade com que ocorre a evaporação na superfície. A quantificação da secagem neste período é feita pela quantificação da energia recebida pelo material que está sendo seco. Esta energia é igual à energia necessária para a vaporização da água removida durante a secagem (PARK et al., 2002). No último período da secagem, denominado decrescente, o movimento da água no sólido pode ocorrer por diferentes mecanismos, como difusão do líquido devido a gradientes de concentração, difusão do vapor devido a gradientes de pressão parcial de vapor e o movimento do líquido por forças capilares (BARBOSA-CÁNOVAS, 2000).

1.3.3 Secagem Solar

A secagem ao sol é um processo importante para a desidratação de grãos e legumes, produzindo mudanças estruturais pequenas, que até mesmo a viabilidade de suas sementes é preservada (AGUILERA et al. 2003). Este tipo de secagem é, provavelmente, o processo de conservação mais antigo que é usado até hoje, principalmente em países como a Índia, onde o tradicional consumo de frutas secas faz parte da cultura das populações. Há algumas desvantagens: exigência de grandes áreas e elevada demanda de mão-de-obra, dificuldade em controlar a taxa de secagem, infestação por insetos, pragas, pássaros e, mais perigosamente a contaminação microbiológica.

A secagem solar, embora seja mais econômica, requer certas condições para a sua viabilidade, como maior área disponível, clima seco, baixa umidade relativa, grande quantidade de horas de sol efetiva, boa evaporação, regime de ventos favoráveis e alta temperatura (ALVES et al., 1999).

O potencial uso da energia solar no setor agrícola aumentou devido à flutuação do preço dos combustíveis fósseis, e razões ambientais. Sistemas de secagem solar assistida são uma das promissoras aplicações de sistemas de energia solar em regiões tropicais e subtropicais (FUDHOLI et al., 2010).

1.3.4 Liofilização

A liofilização é um processo baseado na desidratação por sublimação do produto congelado (RATTI, 2001). Este método de

Revisão Bibliográfica

secagem envolve o congelamento do material e, posteriormente, a sublimação do gelo para o estado vapor produzindo produto seco (BRENNAN, 1994). Sublimação ocorre quando a pressão do vapor de água nas imediações do material congelado é menor do que na parte da frente de gelo no interior do material.

Esta técnica consiste em, inicialmente, congelar o produto rapidamente, para fazer com que as suas características de sabor, aroma e constituintes químicos sejam preservadas. Na etapa subsequente o material congelado é submetido ao vácuo, ocasionando a secagem do produto para aproximadamente 2% em base úmida (CAVALCANTI MATA et al. 2005).

Com relação aos aspectos de qualidade, produtos liofilizados são, em geral, superiores aos produtos obtidos por meio de técnicas convencionais. A liofilização é uma boa alternativa para conservar alimentos, tais como carnes, verduras e frutas, susceptíveis de reações de escurecimento ou que contenham grandes quantidades de proteínas ou voláteis (BARBOSA-CÁNOVAS, 2000). Devido à ausência de água líquida no produto e às baixas temperaturas necessárias para o processo, a maioria de reações degradativas e microbiológicas são reduzidas conferindo um produto final de excelente qualidade (RATTI, 2001).

A textura dos alimentos liofilizados é mantida, isto é, não há endurecimento da estrutura e o encolhimento é pouco evidenciado (FELLOWS, 1997). O estado sólido da água durante o processo de liofilização protege a estrutura primária e minimiza mudanças na forma do produto, causando o mínimo encolhimento (RATTI, 2001).

Apesar de a liofilização proporcionar um produto desidratado de qualidade superior, o método ainda é muito caro, o que limita sua utilização industrial. Deste modo, o uso de liofilização pela indústria de alimentos é normalmente restrito para produtos de alto valor agregado, tais como café, algumas frutas e legumes crocantes, alguns ingredientes prontos para comer e ervas aromáticas (PAN et al. 2008).

1.3.5 Fritura

A fritura é um tratamento a alta temperatura no qual o alimento entra em contato com uma superfície quente ou é imerso em óleo ou gordura quente. É usada principalmente para melhorar a qualidade dos alimentos. Ao mesmo tempo, a maioria dos microorganismos deteriorativos são inativados, e uma crosta superficial é formada, o que

Revisão Bibliográfica

melhora a preservação e a qualidade do produto final (FELLOWS, 1996).

O processo de fritura pode ser definido como um processo de desidratação ultra rápido, onde a remoção de água de um material sólido, no caso o alimento, acontece através da vaporização térmica, e, portanto a temperatura de trabalho é sempre maior que a temperatura do líquido a ser removido. O óleo atua como o meio de transferência de energia para o produto. Seu alto poder calorífico e o íntimo contato deste com o alimento durante o processo levam à remoção de água do produto de maneira bastante rápida e eficiente, promovendo modificação de textura (TOREZAN, 2005).

Óleos e gorduras são líquidos com alto ponto de ebulição, bastante acima do ponto de ebulição da água. O óleo se mantém líquido durante o processo de fritura, enquanto a água do alimento é vaporizada e removida do banho na forma de bolhas de vapor em turbulência. O calor é transferido por convecção do óleo quente para a superfície do alimento frio (VITRAC et al. 2000).

1.3.6 Puff drying

A qualidade de muitos produtos desidratados está ligada à manutenção de seus poros e do volume original do produto *in natura*. Encolhimento e endurecimento é resultado do colapso da estrutura original que afeta os parâmetros de qualidade, como a perda de voláteis, a perda da capacidade de reidratação e diminuição da taxa de reidratação (KARATHANOS e SARAVACOS, 1993).

Para evitar o colapso da estrutura rígida, a temperatura de secagem utilizada deve ser menor que a temperatura de transição vítrea do produto. Isto é possível durante a liofilização, devido às baixas temperaturas utilizadas. Na liofilização os cristais de gelo sublimam sem colapsar o produto seco. O produto final apresenta uma estrutura porosa que facilita a reidratação (BARBOSA- CANOVAS e VEGA-MERCADO, 1996). Entretanto a liofilização é um processo lento e caro, devido ao alto valor do equipamento.

Uma alternativa barata é o método de *puffing*, que produz produtos porosos com estrutura semelhante aos produtos liofilizados. *Puffing* é a liberação ou expansão do gás ou vapor inerte do produto provocando uma expansão ou ruptura da estrutura (PAYNE et al., 1989).

Revisão Bibliográfica

Na figura 1.7 está representado o mecanismo do *puff-drying* antecedido de secagem. Esta técnica, incorporada à secagem convencional com ar quente, foi desenvolvida para produzir alimentos semelhantes aos liofilizados.



Figura 1.7- Mecanismo do *puffing* antecedido de secagem (VARNALLIS et al.,2001).

1.4 Qualidade do Produto Final

1.4.1 Atividade de Água e Teor de Umidade

A água é um dos principais constituintes dos alimentos, o qual afeta a segurança, a estabilidade, a qualidade e propriedades físicas. A influência da água sobre as propriedades dos alimentos resulta da interação entre moléculas de água e os demais componentes do alimento. A extensão e a intensidade das interações dependem da composição química e é determinado pelo estado da água no alimento (LEWICKI, 2004).

Geralmente, o objetivo principal da desidratação de alimentos é prolongar sua vida útil, além de obter produtos com características especiais. Isso é conseguido através da redução da atividade de água (A_w) do alimento a um valor que irá inibir o crescimento e desenvolvimento de micro-organismos patogênicos e deteriorantes, reduzindo significativamente a atividade enzimática e a taxa em que as reações químicas indesejáveis ocorrem (BRENNAN, 1994).

A atividade de água é definida como a relação entre a pressão de vapor da água contida no alimento pela pressão de vapor saturado da água à mesma temperatura (FELLOWS, 1997):

$$A_w = \frac{P}{P_o} \quad (1.1)$$

Revisão Bibliográfica

onde P (Pa) é a pressão de vapor do alimento, P_o (Pa) é a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura.

Os alimentos são classificados em função da atividade de água em três grupos: alimentos com baixa umidade (A_w até 0,60), alimentos com umidade intermediária (A_w entre 0,60 e 0,90) e alimentos com alta umidade (A_w com valores acima de 0,90).

Em alimentos com alto teor de água, em que a atividade de água é maior que 0,90, poderão formar-se soluções diluídas com os componentes do alimento, que serão substratos para o crescimento microbiano. Nessa faixa de atividade de água, as reações químicas e enzimáticas podem ter sua velocidade reduzida em função da baixa concentração de reagentes. Alimentos nessa condição são facilmente contaminados por micro-organismos (RIBEIRO e SERAVALLI, 2004).

Além do crescimento microbiano, os alimentos também são passíveis de sofrerem oxidação, escurecimento não enzimático (reações de Maillard) e reações enzimáticas (BAKER, 1997). Reações químicas, incluindo oxidação lipídica e escurecimento não enzimático são afetadas pelo teor de água. A taxa do escurecimento não enzimático ou oxidação depende dos componentes do sistema, da viscosidade do sistema, da diluição dos reagentes e da mobilidade dos reagentes. Para escurecimento enzimático, a taxa de reação máxima ocorre numa faixa de A_w entre 0,6 e 0,8 (LABUZA e SALTMARCH, 1981 apud LABUZA e HYMAN 1998).

De acordo com MacCarthy (1986), citado por Oliveira (2007), a atividade de água é o único parâmetro que pode ser usado como um guia confiável para prever a degradação de alimentos, ou para determinar o ponto final da secagem necessário para garantir um produto estável. Dois métodos são geralmente utilizados para a medida da atividade de água: métodos gravimétricos e manométricos (ou higrométricos). Os primeiros envolvem medidas da amostra após atingir o equilíbrio, enquanto que nos últimos, as medidas são tomadas pela atmosfera em equilíbrio com a amostra. Os métodos gravimétricos são geralmente mais precisos, mas demandam mais tempo, comparados com os manométricos.

1.4.2 Textura

A textura é um dos três principais atributos de aceitação de alimentos, junto com aparência e sabor, os quais fornecem prazer em

comer e leva o consumidor a decidir se comprará ou não o produto novamente. Ao longo dos anos, inúmeras pessoas já tentaram definir a textura (BOURNE, 2004).

Segundo Bourne (2002) as propriedades de textura de um alimento são um grupo de características físicas que surgem a partir dos elementos estruturais do alimento. São sentidas principalmente pelo sentido do toque, estando relacionadas com a deformação, desintegração e fluxo do alimento devido à aplicação de uma força sobre o mesmo.

A percepção da textura é um processo complexo envolvendo uma síntese de informações de vários sentidos durante um intervalo de tempo. Além disso, a estrutura do alimento, que é percebida pelo consumidor, é alterada durante o processo oral, e depende do indivíduo que experimenta o produto. A percepção da textura ocorre parcialmente durante o processo dinâmico de quebra do alimento na boca e é afetada por processos orais tais como motilidade, produção de saliva e temperatura. Para levar em conta esses fatores, um método multidisciplinar foi proposto para estudar a relação entre a estrutura do alimento e a percepção da textura, combinando pesquisa sensorial, estudos fisiológicos e pesquisa sobre características físico-químicas do alimento (WILSKINSON et al. 2000).

A textura é um importante atributo de qualidade de alimentos de origem vegetal. A parede celular vegetal é determinante na textura de frutos e legumes, suas propriedades influenciam a maneira em que os tecidos vegetais sofrem deformação mecânica e falha durante a mastigação. Processos como o cozimento e eventos fisiológicos como a maturação, podem reduzir a força de adesão celular em frutas e vegetais, pela despolimerização da pectina. Há um grande interesse em reduzir esse processo de separação das células, uma vez que assim seria evitado o amolecimento excessivo e a perda de suculência das frutas ou vegetais (WALDRON et al. 1997).

A textura é, na realidade, um conjunto de propriedades. No entanto, pode-se afirmar que o estímulo na percepção da textura é principalmente mecânico e, conseqüentemente, quase todos os métodos instrumentais de avaliação de textura são ensaios mecânicos. Os ensaios mecânicos medem as relações entre tensão (ou força) e deformação dos materiais e através deles, por ensaios instrumentais, determina-se parâmetros como dureza e coesividade, por exemplo. Os texturômetros universais permitem a obtenção de dados de resistência à compressão, ao cisalhamento, extrusão, corte, entre outros, com rapidez e precisão, registrando a resposta do material durante o processo de medição,

através de curvas de tensão (ou força) x deformação (RODRIGUES, 1999 apud SILVA et al. 2006).

1.4.3 Crocância

Crocância é uma propriedade sensorial caracterizada pela ocorrência de várias fraturas sucessivas no produto quando mastigado. Ela existe enquanto um teor de umidade adequado no produto é mantido e a perda desta característica é devida à adsorção de umidade. A água afeta a textura de alimentos secos através do amaciamento e plastificação da matriz protéica, o que altera a resistência mecânica do produto (LABUZA e KATZ, 1981 apud HOLFSETZ 2003). Para muitos produtos alimentícios a característica de crocância é um atributo sensorial importante sobre o qual o consumidor baseia sua apreciação. Não existe um conhecimento exato dessa característica sensorial, mas há consenso geral de que a sensação de crocância se relaciona às propriedades de ruptura dos materiais (LUYTEN, 2004).

Em produtos crocantes a curva força-deformação apresenta diversos picos, até a ruptura efetiva do alimento. Em materiais com estrutura porosa e quebradiça, como cereais matinais “secos”, a força oscila muito durante a quebra da parede e a desintegração da estrutura. A forma da célula é ligeiramente alterada sob baixas deformações, mas quando o alimento é submetido a altas deformações, as paredes celulares entram em colapso, ocasionando fratura. Em determinado nível de deformação, quando os espaços intracelulares são preenchidos pelos fragmentos da amostra, a resistência mecânica da estrutura aumenta drasticamente. Nesse estágio, o material não é predominantemente celular e sua deformação assemelha-se a um sólido incompressível. A partir de uma determinada atividade de água, a dureza diminui e as curvas tornam-se cada vez mais suaves (TAKEUCHI et al., 2005).

A figura 1.8 mostra uma típica curva de produtos crocantes. Outras curvas de produtos crocantes podem ser encontradas em Laurindo e Peleg (2007, 2008). Esses autores utilizaram o conceito de dimensão fractal para representar o nível de crocância de cereais matinais.

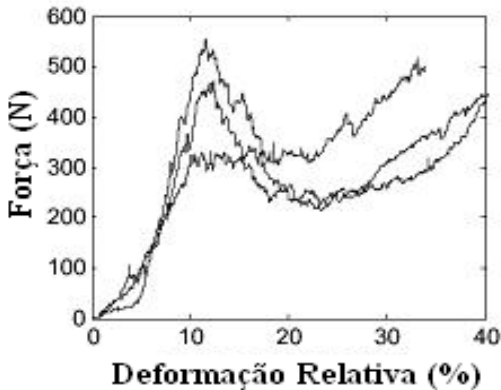


Figura 1.8- Curvas de força-deformação relativa de amostras de cereais matinais submetidas a ensaios de mecânicos (LAURINDO e PELEG, 2007).

A combinação da análise de gravações acústicas com resultados de testes mecânicos tem sido bem sucedida para a previsão de crocância. A fim de se compreender as propriedades de textura dos alimentos, os estudos de investigação acústica devem relacionar a estrutura dos produtos aos sons produzidos durante a quebra da estrutura (DUIZER, 2001). Se um produto não produz o som esperado quando mordido, ele é considerado um produto de baixa qualidade. Medidas acústicas são importantes para entender a textura de alimentos. Através de uma combinação de métodos instrumentais e acústicos, tem sido possível entender melhor a sensação de crocância (DUIZER e CAMPANELLA, 1998).

Mazumder e colaboradores (2007) estudaram o efeito do teor de água através de testes de compressão uniaxial em *snacks* de milho extrusados. Os autores apontam que um bom indicador do comportamento crocante de uma amostra é o número de picos principais, os quais são sensíveis ao teor de umidade da amostra, principalmente quando este é maior que 4%. Observações micro-estruturais indicaram a presença de células de ar separadas por finas paredes celulares.

O teor de umidade desempenha um papel significativo sobre a textura de *snacks* prontos para o consumo, já que afeta diretamente o comportamento crocante, fator chave relacionado à aceitação do produto

Revisão Bibliográfica

(MAZUMDER et al, 2007). O aumento do teor de água no alimento reduz a temperatura de transição vítrea do alimento e, devido ao efeito plasticizante da água, a característica de crocância do produto é perdida (BHANDARI e HOWES 1999). Com isso, a amostra não irá desintegrar facilmente, permanecendo intacta e oferecendo uma maior resistência à deformação (HARRIS e PELEG, 1996).

1.4.4 Capacidade de Reidratação

A reidratação é um processo complexo, cujo objetivo é restaurar as propriedades do produto *in natura* através do contato do produto desidratado com água ou vapor. Dessa maneira, a reidratação pode ser considerada como uma medida das transformações estruturais causadas pela secagem e ou por pré-desidratações em materiais secos. Durante a reidratação de tecidos celulares ocorre a absorção de água pelo material, a recuperação do volume do mesmo e a lixiviação de sólidos solúveis (MCMINN e MAGEE, 1997; LEWICKI, 1998)

A taxa de reidratação pode ser considerada como uma medida das lesões causadas pelo processamento e secagem de um material (LEWICKI, 1998; McMINN e MAGEE, 1997; KROKIDA e MARINOS-KOURIS. 2003). Geralmente é aceita que a capacidade de reidratação é dependente do grau de rompimento celular e estrutural (MARQUES et al. 2007).

A reidratação de tecidos vegetais secos é composta por três processos simultâneos: a absorção de água pelo material seco, um aumento de volume e a lixiviação de sólidos (MCMINN e MAGEE, 1997; LEWICKI, 1998; KROKIDA e PHILIPPOPOULOS, 2005).

Luccas (1996) determinou o grau de reidratação de fatias de banana prata secas convectivamente a 70°C e por secagem a dois estágios (HTST seguido de uma etapa convectiva a 70°C). A reidratação do produto seco foi realizada segundo o método de Kim e Toledo (1987) citado por Cardoso et al. (1998), no qual as amostras são imersas em água fervente. O autor observou altos índices de reidratação das amostras secas por dois estágios, devido à formação de um produto com estrutura mais porosa.

1.5 Modelos de Transferência de Massa

Os modelos matemáticos utilizados para descrever a transferência de massa em processamento de alimentos, frequentemente são baseados em várias soluções da lei da difusão de Fick (CRANK, 1975). Esta lei estabelece que o fluxo de cada componente é proporcional ao gradiente de concentração, de acordo com a equação (1.2):

$$\vec{J}_A = -D \times \vec{\nabla} C_A \quad (1.2)$$

onde J_i é o fluxo do componente A , C_A é a concentração mássica do componente A e D é o coeficiente de difusão do componente A um sistema.

Quando se usa a equação da difusão para descrever processos de transferência de massa em meios porosos, o coeficiente de “difusão”, chamado de coeficiente de difusão aparente, depende da temperatura e da pressão e das propriedades da matriz porosa como a porosidade (ϵ) e a tortuosidade (τ) (CREMASCO, 2008).

A equação da conservação da massa, com a contribuição difusiva em termos da lei de Fick, a qual permite a obtenção da distribuição espacial da concentração do componente A em função do tempo, é dada por:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \underbrace{\vec{\nabla}^2 \cdot D_{ap} \cdot C_A}_{\text{Contribuição difusiva}} - \underbrace{\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \cdot C_A}_{\text{Contribuição convectiva}} \quad (1.3)$$

onde C_A é a concentração mássica do componente A , D_{ap} é a difusividade aparente e v é a velocidade do componente A na matriz (BIRD et al., 1960). Quando se trabalha com sólidos porosos, ou mesmo em géis no interior dos quais há substratos, é comum expressar empiricamente todo o mecanismo de transferência de massa em termos da lei de Fick, onde todas as outras contribuições (capilaridade, osmose, etc.) são englobadas no coeficiente aparente de difusão (CREMASCO, 2008).

Revisão Bibliográfica

Em muitos casos, a equação (1.3) pode ser solucionada analiticamente a partir do conhecimento da geometria do sistema, do coeficiente de difusão e das condições de contorno. A solução dessa equação permite determinar os perfis de concentração no interior do sistema. Se esse perfil for conhecido experimentalmente, ele pode ser usado para estimar a difusividade mássica aparente no meio. Alternativamente, o conhecimento da concentração média do componente de interesse no meio (teor de umidade médio, por exemplo) permite estimar um coeficiente de difusão aparente médio, para uma faixa de teor de umidade do meio. O conhecimento do coeficiente de difusão aparente permite simular a transferência de massa e a distribuição da concentração do componente i no interior do sólido em função do tempo de processo, para outras condições de contorno, por exemplo.

Para casos em que se pode desprezar a contribuição convectiva, Crank (1975) propôs uma solução analítica para a equação 1.3, considerando apenas a contribuição difusiva em sólidos de geometrias clássicas (placa plana infinita, cilindro infinito e esfera).

1.5.1 Placa Plana Infinita

Um meio é considerado infinito se uma das dimensões que caracterizam o sólido é muito maior que as outras dimensões. Para uma placa plana ser considerada infinita, o seu comprimento e a sua largura devem ser bem maiores do que a sua espessura, conforme pode ser observado na figura 1.9.

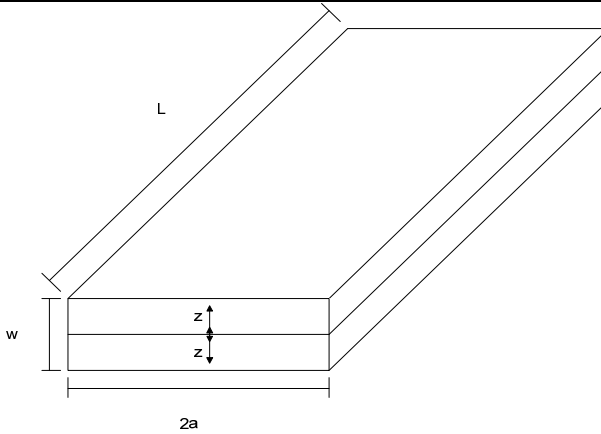


Figura 1.9– Ilustração da geometria da placa plana infinita.

Para uma placa plana, a conservação da espécie A no interior do sistema é dada por:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (1.4)$$

Se o sistema possui concentração inicial uniforme e a resistência à transferência de massa na interface é desprezível, podem-se assumir a condição inicial e as condições de contorno dadas por:

C.I.: para $t=0$; $C_A = C_{A0}$, para qualquer z ;

C.C.1: para $t>0$; em $z=0$; $\left. \frac{\partial C_A}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$;

C.C.2: para $t>0$; em $z=a$; $C_A = C_A^*$;

Há de se notar alguns detalhes nessas condições de contorno:

1. Para $t>0$, em $z=a$, a concentração de água na superfície da placa foi reduzida de C_{A0} para um valor constante C_A^* , o qual está em equilíbrio com a concentração de água presente no meio externo,
2. Para $t>0$, em $z=0$, admite-se a continuidade do fluxo A.

Revisão Bibliográfica

Normalmente, nos ensaios experimentais de processos em batelada medem-se as concentrações médias ao longo do tempo (dificilmente se consegue determinar o perfil espacial de concentração). Para uma placa plana, a concentração média da espécie A é dada por:

$$\bar{C}_A(t) = \frac{1}{a} \int_0^a C_A(z, t) dz \quad (1.5)$$

Assim, a equação que representa a variação da concentração média em função do tempo é dada por (1.6):

$$\frac{\bar{C}_A - C_A^*}{C_{A_0} - C_A^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{2a} \right)^2 D_{ef} t \right] \quad (1.6)$$

onde, \bar{C}_A é a concentração média de água no tempo t , C_{A_0} é a concentração inicial de água na amostra, C_A^* é a concentração de água no equilíbrio.

Representando a equação (1.6) em termos dos números adimensionais, tem-se que:

$$\bar{Y} = \bar{Y}(F_{oM}) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\gamma_n^2} e^{(-\gamma_n^2 F_{oM})} \quad (1.7)$$

As raízes da equação transcendental $\gamma_n \tan \gamma_n = Bi$ são dadas por:

$$\gamma_n = (2n+1) \frac{\pi}{2} \quad (1.8)$$

enquanto o número de Fourier mássico, F_{oM} , que representa um tempo adimensional em função das características do difundente e da geometria característica do meio é dada por:

$$F_{o_M} = \frac{D_{ef} t}{z_1^2} \quad (1.9)$$

sendo o denominador z_1 igual à meia espessura da placa plana.

1.5.2 Cilindro Infinito

Para um cilindro infinito, ou seja, quando o comprimento é muito maior do que o diâmetro, o fluxo do soluto ocorrerá somente na direção radial. A figura 1.10 ilustra a geometria de um cilindro infinito. O fluxo do difundente, para um cilindro, desconsiderando a contribuição convectiva da equação da conservação da massa é dado pela equação 1.10:

$$N_{A,r} = J_{A,r} = -D_{ef} \frac{\partial C_A}{\partial r} \quad (1.10)$$

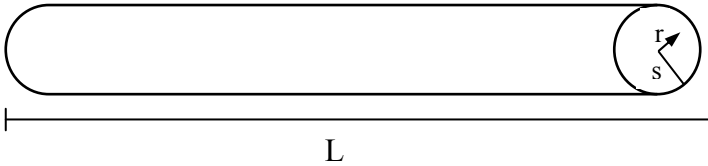


Figura 1.10– Ilustração da geometria de um cilindro infinito.

Como o meio difusivo é inerte, a equação da continuidade da espécie A, escrita em coordenadas cilíndricas é dada por:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \quad (1.11)$$

Se o sistema possui concentração inicial uniforme e a resistência à transferência de massa na interface é desprezível, podem-se assumir a condição inicial e as condições de contorno dadas por:

Revisão Bibliográfica

C.I.: $C_A(r,0)=C_{A0}$, para todo o raio;

C.C.1: $C_A(s,t)= C_A^* = K_p C_{A\infty}$ (para sistemas diluídos e equilíbrio linear);

C.C.2: $\lim_{r \rightarrow 0} C_A(r,t) = \textit{finito}$

A distribuição da concentração adimensional do soluto A é dada por :

$$Y(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\gamma_n} \right) \frac{J_0\left(\gamma_n \frac{r}{s}\right)}{J_1(\gamma_n)} \exp\left(-\gamma_n^2 \frac{D_{ef} t}{s^2}\right) \quad (1.12)$$

Sabendo-se que $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$ são constantes cujos valores estão apresentados na Tabela 1.2:

Tabela 1.2– Raízes de $J_0(\gamma_n)=0$.

γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
2,4048	5,5201	8,6537	11,7915	14,9309	18,0711

Fonte: Spiegel, (1973) apud Cremasco (2008).

Visto tratar-se de um cilindro infinito, é de interesse apenas a variação radial da concentração média do soluto no meio considerado. Por consequência tem-se que:

$$\bar{C}_A = \bar{C}_A(t) = \frac{2}{s^2} \int_0^s C_A(r,t) r dr \quad (1.13)$$

Explicitando a equação (1.12) em termos de $C_A(r,t)$ e substituindo o resultado obtido na equação (1.13), bem como realizando a integração, obtém-se a seguinte expressão para a concentração média adimensional de A:

$$Y = \frac{\bar{C}_A - C_A^*}{C_{A0} - C_A^*} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\gamma_n} \right)^2 \exp\left(-\gamma_n^2 \frac{D_{ef} t}{s^2}\right) \quad (1.14)$$

Revisão Bibliográfica

Na qual rearranjada em termos da distância relativa e pelo número de Fourier mássico, para $z_1=s$, tem-se que:

$$\bar{Y}(F_{o_M}) = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma_n^2} e(-\gamma_n^2 F_{o_M}) \quad (1.15)$$