

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

Marta Fernanda Zotarelli

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO COMBINADO DE  
DESIDRATAÇÃO E MODIFICAÇÃO DA TEXTURA DE MANGA  
POR SECAGEM CONVECTIVA E PULSOS DE VÁCUO**

Florianópolis

2010



Marta Fernanda Zotarelli

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO COMBINADO DE  
DESIDRATAÇÃO E MODIFICAÇÃO DA TEXTURA DE MANGA  
POR SECAGEM CONVECTIVA E PULSOS DE VÁCUO**

Dissertação submetido(a) ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis

2010



*Aos meus amados pais Arlete e Antonio  
e ao meu irmão Lincoln*



## AGRADECIMENTOS

Que difícil é fazer uma lista de agradecimentos, sabendo que são tantas as pessoas que colaboram conosco e que nos possibilitam a realização de um sonho! Como já disse Charles Chaplin: “... Cada pessoa que passa em nossa vida passa sozinha e não nos deixa só, porque deixa um pouco de si e leva um pouquinho de nós”. Mas por não ser possível citar todos, destacamos:

À Deus!

Ao Professor e Orientador Dr. João Borges Laurindo pela excelente orientação, pelo exemplo de profissional, pela confiança e paciência e pela contribuição para o meu crescimento profissional.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, em especial a Prof. Dra. Alcilene pela atenção e carinho.

Aos professores da Universidade Estadual de Maringá, em especial Prof. Dra. Grasielle Scaramal, Prof. Dr. Benício, Prof. Dr. Antonio Monteiro e Prof. Dr. Edmar Clemente pelos ensinamentos, incentivo, carinho e amizade.

Aos colegas de laboratório Carmen, Fran, Bruno, Jaque, Darlene, Vivian, Gustavo, Cris, Marieli, Gabriel e em especial ao Fabinho pela amizade e pelas correções deste trabalho. Aos ICs: José Eduardo, Thacy, Jaquinha, Cristian. Muito obrigada a todos vocês do PROFI, pela amizade, companhia, ajuda e pelos bons momentos!

Em especial a minha mais que colega de trabalho, colega de residência, amiga-irmã, companheira dos momentos bons e ruins: Barbara! Obrigada Nega pelo carinho, amizade, ensinamentos, brincadeiras, pelos consolos nas horas de choro, pela paciência, enfim... Te admiro, aprendi muito contigo e só tenho que te agradecer por tudo!

Aos colegas de mestrado: Dani, Kátia, Kelin, Silvia, Thiago, Su, Su Miorelli, Amanda, Luiz F., Caco e Gilson pelos momentos de estudo e amizade.

As colegas de moradia e amigas: Paty, querida obrigada pelos estudos, conselhos, conversas, apoio, pelas parcerias nas festinhas e pelas “praias”. A Morgana, minha querida irmã de coração que muito me ajudou, que eu admiro muito e respeito, uma das amizades que tenho certeza que vou levar para a vida! A Gi, Karen e Andressa pela convivência.

Aos meus colegas de graduação, em especial para as colegas: Gabi, Flavinha, Andressa e Julinha!

Aos meus ex-colegas de Perdigão, em especial ao Márcio Gris e ao Daniel Sam pelo incentivo e amizade!

A querida Raquel (secretaria CPGEA) pela amizade, gentileza e presteza em nos ajudar a resolver os problemas.

As meninas do Mercadinho Alternativo pela gentileza!

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos membros da banca pelas contribuições.

A Vanessa, minha cunhada pela amizade, ajuda e incentivo!  
Muito obrigada!

E em especial aos meus maiores incentivadores, as pessoas mais importantes da minha vida: meus pais Arlete e Antonio e meu irmão Lincoln. Obrigada por vocês existirem e serem meus pais e “irmão”, por mais que eu procurasse palavras, elas não seriam suficientes para definir o que eu sinto por vocês! Obrigada pelo exemplo, pela força, paciência, incentivo, enfim, obrigada por todo amor! Dedico este trabalho a vocês!



*DAS UTOPIAS*  
“Se as coisas são inatingíveis... ora!  
Não é motivo para não querê-las...  
Que tristes os caminhos, se não fora  
A presença distante das estrelas!”  
*ESPELHO MÁGICO*

*Mário Quintana*



## RESUMO

Realizou-se um estudo de diferentes tecnologias de desidratação e o desenvolvimento de um método alternativo de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para a obtenção de manga desidratada com qualidade superior. Para isso, investigou-se a desidratação osmótica (DO) como pré-tratamento à secagem. As condições de processo usadas durante a DO foram solução osmótica a 65°Brix, a 30°C, e razão mássica de fruta:solução de 1:30. 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 5 horas, onde o valor de PA foi de 58%, o GS foi de 10,16% e a PM foi de 45%. Para o mesmo tempo, os valores da atividade de água ( $a_w$ ) e da umidade ( $U_{bs}$ ) foram, respectivamente, de 0,916 e 1,27g de água/g de sólidos secos. A partir disto, confirmou-se a necessidade de um processo de secagem complementar para a preservação do produto final. Assim, estudou-se a secagem convectiva (SC) e a secagem por CAPV das amostras pré-tratadas por DO e das amostras sem pré-tratamento. Durante a SC, em estufa com circulação forçada de ar a 60°C, observou-se que em 16 horas de processo a  $U_{bs}$  das amostras pré-tratadas foi de 0,22g de água/g de sólidos secos e a  $a_w$  foi de 0,462, enquanto que as amostras sem pré-tratamento apresentaram valores de  $U_{bs}$  0,02 g de água/g de sólidos secos e de  $a_w$  de 0,358. Além disso, as amostras ao final da SC apresentaram estrutura colapsada, verificada tanto na microscopia eletrônica de varredura (MEV), quanto pelo comportamento da curva de força-deformação nos ensaios mecânicos de perfuração. A secagem por CAPV consistiu no acondicionamento das amostras em uma grade e na alocação desta dentro de uma câmara encamisada. As amostras foram aquecidas até 60°C e a câmara foi fechada e pressurizada. Após 5 minutos de vácuo, 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:  $m_{\text{evap}}=(m_{\text{amostra}}C_p \times \Delta T)/\Delta H_{\text{vaporização}}$ . Amostras secas a partir de frutas *in natura* apresentaram, após 12 ciclos,  $U_{bs}$  =0,09 g de água/g sólidos secos, e  $a_w$  = 0,359, enquanto para as amostras pré-tratadas que sofreram 10 ciclos, estes valores foram:  $U_{bs}$  =0,14g de água/g de sólidos secos e  $a_w$ =0,375. Amostras de manga comerciais liofilizadas foram também

avaliadas e apresentaram valores de  $U_{bs} = 0,08$  g de água/g de sólidos secos e  $a_w = 0,325$ , valores próximos dos valores observados para amostras secas por CAPV. Além de possibilitar a obtenção de produtos com baixos teores de umidade e atividade de água ao final da secagem, as frutas secas por CAPV apresentaram textura crocante, evidenciada pelas curvas irregulares obtidas nos ensaios mecânicos. Através das análises de MEVs foram verificadas a formação da matriz porosa e a semelhança da estrutura das amostras secas por CAPV com as amostras comerciais liofilizadas. Deste modo, este trabalho apresenta resultados que podem ser de grande utilidade para o aproveitamento industrial e agregação de valor às mangas.

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

## ABSTRACT

Different technologies of dehydration were compared to an alternative dry method, which consisted in the application of successive cycles of heating-and-puffing (multi-puff-drying, MPD) to obtain high quality dried mangoes. Osmotic dehydration (OD) was investigated as a pre-treatment to drying. The OD process conditions used were sucrose at a concentration of 65°Brix under 30°C with a solution:sample mass relation of 30:1. The mass transport was characterized by the determination of sample mass loss (ML) water loss (WL) and sugar gain (SG). At 5 h after the beginning of the processing, it was observed 58% of WL, 45% of ML and 10% of SG of the sample. At same evaluation time, the values of water activity ( $a_w$ ) and moisture content ( $W_{db}$ ) was 0.916 and 1.27 g water/g dry solids, respectively. The results from the OD pre-treatments confirmed the need of a complementary drying process to preserve mangoes. Therefore, it was carried out a study comparing convective drying (CD) and MPD processes of pretreated and non-pretreated mango samples. The CD treatment consisted in to dry the sample at 60°C in a forced air drier for 16 h. The  $W_{db}$  of mango sample was 0.22 g water/g dry solids for pretreated and 0.02 g water/g dry solids non-pretreated, respectively. The  $a_w$  were 0.462 and 0.358 for pretreatment and non-treatment samples, respectively. Moreover, samples at the end of CD have showed a compact structure, which was verified by the analysis of sample images with scanning electron microscopy (SEM) and by the behavior of Strain-force curves from mechanical measurements of puncturing tests. The MPD drying consisted of storing the samples in a grid and then allocated it inside a jacketed container. The samples were heated up to 60°C, then samples were maintained under vacuum during 5 min, which consisted in a cycle. The number of cycles were estimated by considering that the flash evaporation was a isenthalpic process, i.e.,  $m_{evap} = (m_{sample} C_p \times \Delta T) / \Delta H_{vaporization}$ . Dried samples from fresh mango showed, after 12 cycles  $W_{db} = 0.09$  g water/g dry solids, and  $a_w = 0.359$ , while pre-treated samples after 10 cycles of MPD showed of 0.14 g water/g dry solids and  $a_w$  of 0.375. Commercial dried mangoes by freeze-drying process  $W_{db}$  of 0.08g water/g dry solids and  $a_w$  values of 0.325, which were similar to the observed values of dried samples under MPD. In addition, MPD resulted in a final product with low moisture content and water activity in the end of drying process with crispy texture confirmed by strain-force curves. The analysis of images with SEM, it was verified

the similar formation of a porous matrix on the sample surface between MPD samples and commercial freeze-dried samples. Thus, the presented results showed that MPD has potential industrial use and may add value to dry mango products.

Keyword: mango, osmotic dehydration, convective drying, multi-puff-drying.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>29</b>
<b>1.1- MANGA.....</b>	<b>29</b>
1.1.1 - <i>Variedade Tommy Atkins.....</i>	<i>30</i>
1.1.2 - <i>Dados Econômicos.....</i>	<i>31</i>
<b>1.2 - DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA.....</b>	<b>32</b>
<b>1.3 - PROCESSOS COMPLEMENTARES DE SECAGEM.....</b>	<b>34</b>
1.3.1- <i>Secagem Solar.....</i>	<i>34</i>
1.3.2 - <i>Secagem Convectiva.....</i>	<i>35</i>
1.3.3 - <i>Liofilização.....</i>	<i>39</i>
1.3.4 – <i>Puff Drying.....</i>	<i>42</i>
<b>1.4 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE FRUTAS DESIDRATADAS.....</b>	<b>43</b>
1.4.1 – <i>Teor de Umidade e Atividade de Água.....</i>	<i>44</i>
1.4.2 – <i>Propriedades Mecânicas – Textura.....</i>	<i>46</i>
1.4.3 – <i>Reidratação.....</i>	<i>48</i>
<b>1.5 – MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA. 49</b>	
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
<b>2.1. SELEÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS.....</b>	<b>53</b>
2.1.1 – <i>Seleção das Frutas.....</i>	<i>53</i>
2.1.2 – <i>Preparo das Amostras.....</i>	<i>54</i>
2.1.3 – <i>Determinação das Propriedades Físico-químicas das Frutas in natura.....</i>	<i>55</i>
<b>2.2. ALTERNATIVAS DE SECAGEM.....</b>	<b>55</b>
<b>2.3. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA.....</b>	<b>56</b>
2.3.1 – <i>Preparo das Soluções de Sacarose.....</i>	<i>56</i>
2.3.2– <i>Equipamentos Utilizados na Desidratação Osmótica (DO).....</i>	<i>56</i>
2.3.3 – <i>Procedimento para o Tratamento Osmótico ....</i>	<i>57</i>
2.3.4 - <i>Determinação dos parâmetros perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de massa (PM).....</i>	<i>57</i>
2.3.5 – <i>Cinética da Desidratação Osmótica.....</i>	<i>58</i>
2.3.6 – <i>Modelagem da cinética de perda de água pelas amostras de manga durante o tratamento osmótico.....</i>	<i>58</i>
<b>2.4. SECAGEM CONVECTIVA.....</b>	<b>60</b>

<b>2.5. MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM.....</b>	<b>61</b>
<b>2.6. SECAGEM POR CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO.....</b>	<b>62</b>
2.6.1. Dispositivo experimental para a secagem por ciclos aquecimento-pulso de vácuo.....	62
2.6.2. Fundamentação Teórica.....	64
2.6.3. Procedimento Experimental para Secagem por Ciclos de Aquecimento-pulso de vácuo (Multi-puff-drying).....	66
2.6.4. Cálculo do Número de Ciclos de Aquecimento-Pulso de Vácuo.....	66
<b>2.7. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....</b>	<b>68</b>
<b>2.8. MEDIDA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS....</b>	<b>68</b>
<b>2.9. REIDRATAÇÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS FRUTAS IN NATURA.....</b>	<b>71</b>
<b>3.2. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA.....</b>	<b>72</b>
3.2.1. Cinética da Desidratação Osmótica.....	72
3.2.2. Modelagem da perda de água nas amostras de manga.....	75
<b>3.3. SECAGEM CONVECTIVA.....</b>	<b>79</b>
<b>3.4. SECAGEM POR CICLOS AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO – MULTI-PUFF-DRYING.....</b>	<b>84</b>
<b>3.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....</b>	<b>91</b>
<b>3.6. ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>94</b>
<b>3.7. GRAU DE REIDRATAÇÃO.....</b>	<b>97</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>101</b>



## LISTA DE FIGURAS

### ***CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

<b>Figura 1.1</b> -	Fotografia de mangas da variedade “Tommy Atkins”.....	31
<b>Figura 1.2</b> -	Representação esquemática do transporte de massa no processo osmótico.....	33
<b>Figura 1.3</b> -	Representação esquemática do movimento da água durante a secagem.....	36
<b>Figura 1.4</b> -	Curvas típicas de secagem.....	37
<b>Figura 1.5</b> -	Diagrama de fases da água.....	40
<b>Figura 1.6</b> -	Diagrama com as etapas da liofilização.....	41
<b>Figura 1.7</b> -	Representação esquemática do mecanismo de <i>puffing</i> .....	42
<b>Figura 1.8</b> -	Relação da taxa de deterioração de alimentos em função da atividade de água.....	45
<b>Figura 1.9</b> -	Curvas de força-deformação relativa de amostras de cereais matinais submetidas a ensaios de mecânicos.....	48
<b>Figura 1.10</b> -	Ilustração da geometria da placa plana infinita..	51

### ***CAPÍTULO II - MATERIAS E MÉTODOS***

<b>Figura 2.1</b> -	Representação esquemática do corte das mangas.....	54
<b>Figura 2.2</b> -	Dispositivo utilizado para os cortes das mangas.....	54
<b>Figura 2.3</b> -	Tecnologias de secagem estudadas para obtenção de mangas desidratadas .....	55
<b>Figura 2.4</b> -	Dispositivo experimental utilizado para estudos de desidratação osmótica das amostras de frutas	56
<b>Figura 2.5</b> -	Rede utilizada para condicionar as amostras de mangas submetidas à desidratação osmótica.....	57
<b>Figura 2.6</b> -	Representação do algoritmo utilizado para estimativa dos valores de $D_{ef}$ da água nas amostras de manga para cada intervalo de tempo.....	59

<b>Figura 2.7 -</b>	Estufa com renovação e circulação de ar utilizada para secagem das amostras desidratadas.....	60
<b>Figura 2.8 -</b>	Diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para aplicação dos pulsos de vácuo.....	63
<b>Figura 2.9 -</b>	Grade utilizada para acondicionamento das amostras submetidas à secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	63
<b>Figura 2.10 -</b>	Relação entre a pressão de saturação da água e a temperatura de saturação. Equação de Antoine: $\log_{10} P_{\text{vaporsat}}=A-(B/(T-C))$ ; Para a água: A=7,96681; B=1668,21; C=228,0.....	64
<b>Figura 2.11 -</b>	Algoritmo utilizado para o cálculo do decréscimo de massa teórica de mangas submetidas à secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	68

### ***CAPÍTULO III – RESULTADOS E DISCUSSÃO***

<b>Figura 3.1 -</b>	Cinética de perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de massa (PM) na desidratação osmótica de mangas. Condições do ensaio: 30°C e concentração da solução de 65°Brix, proporção fruta:solução 1:30.....	72
<b>Figura 3.2 -</b>	Curva de atividade de água pelo tempo de desidratação osmótica de manga, conduzida em solução osmótica a 30°C e 65°Brix com a proporção de 1:30 de fruta para solução.....	74
<b>Figura 3.3 -</b>	Fotografia das amostras de manga após 5 horas de desidratação osmótica a 30°C e 65°Brix com a proporção de 1:30 de fruta:solução.....	75
<b>Figura 3.4 -</b>	Coefficientes de difusão efetiva da água em função da concentração adimensional de água para manga tratada osmoticamente em solução a 65°Brix e 30°C.....	76

<b>Figura 3.5 -</b>	Ajuste dos dados da concentração adimensional da umidade de mangas tratadas osmoticamente ao modelo difusional baseado no menor, no maior e no valor mediano do coeficiente de difusão em função do tempo.....	77
<b>Figura 3.6 -</b>	Ajuste dos dados da cinética de desidratação osmótica de manga em solução a 65°Brix e 30°C, desconsiderando o encolhimento das amostras durante o processamento.....	78
<b>Figura 3.7 -</b>	Curva de secagem de mangas secas a partir de amostras <i>in natura</i> e submetidas à desidratação osmótica, secadas em estufa com circulação forçada de ar a 60°C, umidade relativa de 12% e velocidade do ar de 1m/s.....	79
<b>Figura 3.8 -</b>	Varição da taxa de secagem em função da umidade na secagem convectiva, a 60°C, de amostras de manga secas a partir de frutas <i>in natura</i> e de frutas pré-desidratadas osmoticamente.....	80
<b>Figura 3.9 -</b>	Cinética de secagem de mangas secas a partir de amostras <i>in natura</i> e submetidas à desidratação osmótica ajustados pelos modelos empíricos de Page e de Peleg.....	82
<b>Figura 3.10 -</b>	Evolução da atividade de água de mangas <i>in natura</i> e pré-tratadas por desidratação osmótica, secadas em estufa com circulação forçada de ar a 60°C.....	83
<b>Figura 3.11 -</b>	Fotografia de manga sem pré-tratamento osmótico após secagem convectiva em estufa com circulação forçada de ar - (a) vista superior; (b) vista lateral.....	84
<b>Figura 3.12 -</b>	Evoluções temporais da pressão da câmara de secagem e da temperatura das amostras durante a secagem de manga pela aplicação de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	85
<b>Figura 3.13 -</b>	Umidades experimental e teórica calculada considerando a evaporação da água e o calor específico em cada pulso.....	86
<b>Figura 3.14 -</b>	Evolução do calor específico das amostras de manga durante a secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	86

<b>Figura 3.15 -</b>	Curva experimental do teor de umidade por número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, aplicados em amostras de manga pré-desidratadas em solução osmótica a 65°Brix, 30°C por 5 horas e sem pré-tratamento.....	87
<b>Figura 3.16 -</b>	Curva da atividade de água por número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aplicados em mangas pré-desidratadas em solução osmótica a 65°Brix, 30°C por 5 horas e mangas sem pré-tratamento.....	89
<b>Figura 3.17 -</b>	Fotografias de amostras de mangas a cada ciclo de aquecimento-pulso de vácuo: (a) desidratadas a partir de amostras <i>in natura</i> e (b) desidratadas a partir de amostras pré-desidratadas por desidratação osmótica.....	90
<b>Figura 3.18 -</b>	Fotografia de amostras de manga sem pré-tratamento após 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	90
<b>Figura 3.19 -</b>	Fotografia de amostra de manga sem pré-tratamento após 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo - (vista superior).....	91
<b>Figura 3.20 -</b>	Fotografia de amostras de manga comercial liofilizada – marca ‘A’.....	91
<b>Figura 3.21 -</b>	Fotografia de amostras de manga comercial liofilizada – marca ‘B’.....	91
<b>Figura 3.22 -</b>	Micrografias: (a) fratura de manga comercial liofilizada; (b) fratura de manga seca por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo; (c) e (d) fratura de manga seca convectivamente.....	92
<b>Figura 3.23 -</b>	Micrografias: (a) superfície de manga comercial liofilizada; (b) superfície de manga seca por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo; (c) superfície de manga seca convectivamente...	94
<b>Figura 3.24 -</b>	Curvas de força-deformação relativa de amostras comerciais liofilizadas, secadas convectivamente e por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	95

<b>Figura 3.25 -</b>	Curvas de força-deformação relativa de amostras pré-tratadas em solução osmótica (65°Brix e 30°C) e secas por convecção e amostras secas por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.....	96
<b>Figura 3.26 -</b>	Grau de reidratação por tempo de imersão das amostras em água em ebulição.....	97



## LISTA DE TABELAS

### *CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*

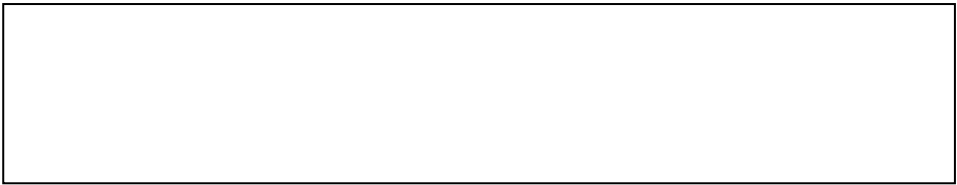
<b>Tabela 1.1 -</b>	Composição da manga var. Tommy Atkins por 100 gramas da parte comestível.....	30
---------------------	---	----

### *CAPÍTULO II - MATERIAS E MÉTODOS*

<b>Tabela 2.1 -</b>	Propriedades do vapor da água sob diferentes pressões.....	65
---------------------	--	----

### *CAPÍTULO III – RESULTADOS E DISCUSSÃO*

<b>Tabela 3.1 -</b>	Propriedades físico-químicas das amostras de manga (var. Tommy Atkins).....	71
<b>Tabela 3.2 -</b>	Erro médio quadrático percentual (%MSE) para o modelo difusivo fixando o maior, o menor e o valor mediano para o coeficiente de difusão.....	78
<b>Tabela 3.3 -</b>	Resultados dos ajustes dos modelos de Page e de Peleg para a secagem de manga.....	81





## INTRODUÇÃO

A demanda dos consumidores por alimentos saudáveis em sua dieta tem aumentado nos últimos anos, todavia o tempo para a realização das refeições tem diminuído e a busca por alimentos industrializados que mantenham as características originais é cada vez maior. Nesse contexto, a produção de alimentos manipulados que sejam agradáveis sensorialmente, estáveis e com as propriedades nutricionais preservadas, requer o desenvolvimento de operações que minimizem os efeitos adversos do processamento (TORREGGIANI, 1993).

Durante séculos, o homem tem utilizado a remoção de água de carnes, frutas e vegetais como forma de preservá-los (AGUILERA et al., 2003). A utilização da energia do sol para a geração de calor e consequente evaporação da umidade do alimento é umas das tecnologias de secagem mais antigas, mas nem por isso abandonada. Pois, nos dias atuais é utilizada, principalmente, em países que apresentam quantidade de dias ensolarados adequados durante o ano.

Além da secagem solar, os alimentos podem ser desidratados por secagem com ar quente, secagem a vácuo, através de liofilização, ou ainda através de métodos combinados, como combinações de processos de desidratação osmótica ou de impregnação a vácuo usando soluções altamente hipertônicas com secagem convectiva.

Segundo o Instituto Brasileiro de Frutas - IBRAF (2009), a produção nacional de frutas no ano de 2007 foi de 43.112.804 toneladas. Dadas às características intrínsecas do sistema agroindustrial brasileiro, juntamente com os dados de produção, pode-se inferir que a indústria de alimentos apresenta condições de competir tanto no mercado interno como o externo, pois possui capacidade tecnológica para produzir produtos com elevado valor agregado (BUENO et al., 2008).

Embora o Brasil tenha potencial para o desenvolvimento da indústria alimentícia, o país ainda apresenta a característica marcante de perder um elevado percentual de produtos, o que se debita principalmente a uma logística inadequada, à falta de cuidado no manuseio ou a ambos os fatores aliados a matérias-primas com alta perecibilidade, devido às taxas intensas de respiração celular, como é o caso da manga (SUGAI, 2002; MARTIM, 2006).

Para frutas como a manga, que se deteriora com grande facilidade, dificultando a comercialização de toda a safra *in natura*, a industrialização se apresenta como uma importante alternativa para o excedente de produção. Mais especificamente, as frutas desidratadas ou secas são produtos com maior valor agregado e entram na composição de diversos produtos da agroindústria de alimentos que são consumidos no mercado interno e também bastante apreciados no mercado externo (BUENO et al., 2008).

Nesse contexto, foram estudados neste trabalho processos de secagem para a manga, visando compreender a fenomenologia e encontrar técnicas e procedimentos adequados para a produção de frutas secas com qualidade superior. Espera-se com este trabalho contribuir para a criação de alternativas tecnológicas para o aproveitamento industrial e agregação de valor às mangas.

## Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo comparativo de diferentes estratégias de desidratação para a 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 de desidratação osmótica;
- c) Estudar a cinética da secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo das frutas *in natura* e das frutas pré-desidratadas;
- d) Analisar parâmetros de qualidade do produto final 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 matéria-prima utilizada, à desidratação osmótica como pré-tratamento, aos processos complementares de secagem - convectiva e por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo -, além de parâmetros de qualidade dos alimentos, como a atividade de água, o teor de umidade e as propriedades de textura e reidratação. O segundo capítulo refere-se aos materiais e métodos. Nele se descreve a montagem dos equipamentos utilizados nos experimentos, bem como a metodologia utilizada para realização dos ensaios e os cálculos dos parâmetros de interesse. No terceiro capítulo apresentam-se os resultados experimentais e faz-se a discussão dos resultados obtidos. Nas seções seguintes apresentam-se as conclusões e as referências bibliográficas.



## CAPÍTULO I

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre a matéria-prima utilizada neste estudo. Aborda-se também o tratamento osmótico aplicado a frutas e vegetais, os processos de secagem, seus mecanismos e suas aplicações. Parâmetros de qualidade para frutas também são apresentados.

#### 1.1. MANGA

A mangueira (*Mangifera indica* L.) pertence à família *Anacardiaceae* e é cultivada há mais de 4.000 anos. Originária do Sul da Ásia, mais precisamente da Índia e do arquipélago Malaio, de onde foi disseminada para outras partes do mundo, inclusive para as Américas. A manga é classificada como um fruto climatérico, isto é, completa a maturação mesmo depois de colhido. A árvore da mangueira é de grande porte, podendo chegar a até 30 metros de altura, com copa densa e frondosa (CUNHA et al., 1994).

As áreas que mais se adaptam ao cultivo da mangueira são as que têm as estações secas e chuvosas bem-definidas. O período de estiagem deve ocorrer antes do florescimento, a fim de permitir o repouso vegetativo da planta, e prolongar-se até a frutificação. Após este período é benéfica a ocorrência de chuva, para estimular o desenvolvimento dos frutos e impedir sua queda (CUNHA et al. 1994). A semeadura da manga no Brasil é feita entre os meses de outubro e março, período em que se concentra a colheita (SÃO JOSÉ et al., 1996; CUNHA et al. 1994). O estágio de maturação no qual o fruto é colhido determina sua qualidade e potencial de armazenamento (COCOZZA, 2003). O grau de maturação ideal para a colheita vai depender do tempo

que o fruto levará para ser consumido ou industrializado. O critério mais usado para determinar o ponto de colheita dos frutos é a mudança de cor da casca e da polpa. Além da mudança de cor, outros critérios têm sido usados para estabelecer o ponto ótimo de colheita: resistência da polpa à pressão de 1,75 a 2,0 kgf/cm<sup>2</sup>, sólidos solúveis totais de 12°Brix, entre outros (CUNHA et al., 1994).

Os principais constituintes da manga são água, carbo-hidratos, proteínas e vitaminas, conforme pode ser observado na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1** - Composição da manga var. Tommy Atkins por 100 gramas da parte comestível.

<b>Composição centesimal</b>	<b>Valor por 100 g</b>
Umidade	85,8g
Energia	51 kcal 212 kJ
Proteína	0,9 g
Lipídeos	0,2 g
Colesterol	NA
Carbo-hidratos	12,8 g
Fibra Alimentar	2,1 g
Cinzas	0,3 g
Cálcio	8 mg

Fonte: NEPA-UNICAMP, 2006.

No Brasil, as principais variedades cultivadas em áreas comerciais são: Tommy Atkins, Espada, Rosa, Haden, Palmer, Keitt, Van Dyke, entre outras (SÃO JOSÉ et al., 1996).

### 1.1.1. Variedade Tommy Atkins

Originária da Flórida, EUA, possui fruto de tamanho médio para grande, com casca espessa, lisa, apresentando coloração atraente do laranja-amarelo ao vermelho-brilhante e formato oval. A polpa é firme, suculenta, com teor médio de fibras e teor de sólidos solúveis próximos a 16°Brix. É uma das variedades de manga mais cultivadas mundialmente para exportação. Apresenta facilidade para indução floral em época quente e alta produtividade (CUNHA et al., 1994; COSTA e SANTOS, 2004).

A manga da variedade Tommy Atkins é a fruta que melhor atende às exigências do mercado internacional, em razão de sua

coloração avermelhada, que a torna mais atraente para o consumidor, e de sua casca grossa, que a torna mais resistente ao armazenamento e transporte. Cerca de 80% da plantação brasileira são desta variedade de manga, vindo em seguida a manga tipo Haden, que ocupa cerca de 10% das culturas da mangueira (MAPA, 2007).



**Figura 1.1** – Fotografia de mangas da variedade “Tommy Atkins” (COSTA e SANTOS, 2004).

### 1.1.2. Dados econômicos

Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a produção brasileira de manga no ano de 2007 foi de 1.272.180 toneladas, o que representa 2,95% da produção nacional de frutas naquele mesmo ano, que foi de 43.112.804 toneladas (IBRAF, 2009). No Brasil, a manga é cultivada em quase todas as regiões, mas está concentrada especialmente em dois pólos, no Vale do Rio São Francisco e no Estado de São Paulo. O destaque é para o Estado da Bahia, que foi o maior produtor de manga no ano de 2007, com 634.715 toneladas, enquanto São Paulo teve uma produção de 193.151 toneladas no mesmo ano (IBRAF, 2009).

Entre os anos de 1994 a 2005 a taxa anual do crescimento da produção de manga no Vale do Rio São Francisco foi de 5,8%. Esse crescimento deve-se em grande parte ao uso de novas tecnologias, como a indução floral, além das condições climáticas e irrigação, pela qual se garante a oferta de manga durante todo o ano. Essa técnica assegura vantagem competitiva da produção do Nordeste em relação àquela do Sudeste, visto que essa região oferta a fruta entre os meses de outubro e janeiro, dificultando o acesso ao mercado externo (MAPA, 2007).

No mundo, a manga é uma das frutas tropicais mais produzidas, dominando cerca de 40% da produção. Apesar da grande produção, a manga é pouco comercializada quando comparada com a quantidade

produzida, principalmente devido às perdas pós-colheita que representam de 30 a 40% da produção mundial (FAO, 2009; GIRALDO et al., 2003). Dessa maneira, a industrialização é uma alternativa eficaz para o aproveitamento da produção excedente, além de agregar valor ao produto, podendo ser utilizada como matéria-prima para a produção de outros produtos.

## 1.2. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

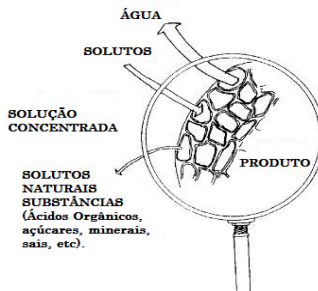
Os primeiros estudos sobre desidratação osmótica (DO) iniciaram com Pointing e colaboradores (1966), e atualmente a DO tem sido considerada uma importante ferramenta tecnológica para o desenvolvimento de novos produtos, com valor agregado e propriedades funcionais (SPIAZZI e MASCHERONI, 1997; TORREGIANI e BERTOLO, 2001b; RASTOGI et al., 2002).

A DO é uma operação usada para remoção parcial da água de tecidos celulares através do contato do produto, inteiro ou em pedaços, com soluções hipertônicas de sal e/ou açúcar e com baixa atividade de água (SPIAZZI e MASCHERONI, 1997; SERENO et al., 2001; RASTOGI et al., 2002; IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2003; CHIRALT e TALENS, 2005; RASTOGI et al., 2005)

Em tecidos vegetais, a transferência de massa (TM) nos processos osmóticos ocorre através da complexa estrutura da parede celular e pelos gradientes de concentração estabelecidos entre a solução e o alimento, que ocasionam dois fluxos simultâneos: a saída de água para a solução e, na direção oposta, a transferência de solutos da solução osmótica para o produto (SPIAZZI e MASCHERONI, 1997; RASTOGI et al., 2005; MARTIM, 2006; NETO et al., 2004).

Tendo em vista que a membrana celular não é perfeitamente seletiva, solutos presentes nas células (ácidos orgânicos, açúcares redutores, minerais, pigmentos, etc.) também podem ser lixiviados para a solução. Como consequência desse intercâmbio de água e sais, o produto perde massa e pode encolher, como representado esquematicamente na Figura 1.2 (SPIAZZI e MASCHERONI, 1997; RASTOGI et al., 2002; RASTOGI et al., 2005).





**Figura 1.2** - Representação esquemática do transporte de massa no processo osmótico (TORREGIANI, 1993).

O principal mecanismo através da qual a TM ocorre é a difusão devido ao gradiente de concentração existente entre o alimento e a solução osmótica (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2003). A taxa de TM do processo é afetada principalmente pela natureza do produto (espécie, variedade, grau de maturação, forma e tamanho das amostras, presença de espaços intercelulares, presença de gases, etc.) e pelas variáveis de processo, como temperatura, composição e concentração da solução osmótica, pressão de trabalho (pressão atmosférica ou vácuo), proporção entre as massa de produto e de solução, grau de agitação da solução. A aplicação simultânea de outras técnicas, como ultrassom (SIMAL et al., 1998), campo elétrico de alta intensidade (RASTOGI et al., 1999) ou alta pressão hidrostática, (RASTOGI et al., 1998), as quais alteram as membranas celulares também modificam as taxas de transferência de massa entre os frutos e a solução osmótica (CHIRALT e TALENS, 2005; ITO et al., 2007).

A DO é geralmente usada como pré-tratamento de outros processos para redução do consumo de energia dos processos posteriores e melhora da qualidade nutricional e sensorial e das propriedades funcionais do alimento sem alterar sua integridade (TORREGIANI, 1993). Assim, a DO pode ser usado como pré-tratamento antes de processos de congelamento, liofilização, secagem a vácuo ou secagem convectiva (NANJUNDASWAMY, 1978; HAWKES AND FLINK, 1978; DIXON E JEN, 1977; PONTING, 1973 apud PAES, 2005).

Muitos trabalhos têm reportado estudos visando à compreensão das variáveis de processo e o modo como elas interferem nas propriedades do produto final, assim como sobre a avaliação da desidratação osmótica como tratamento antecedente a outros processos.

Boeira (2005) realizou estudo sobre a DO como método de pré-tratamento para secagem de pêssegos, avaliando parâmetros de processos como concentração da solução hipertônica, temperatura e tempo de tratamento. Dois processos complementares de secagem foram também pesquisados neste trabalho: a secagem convectiva e aquela feita por meio do aquecimento em forno micro-ondas seguido por pulsos de vácuo. Os resultados da análise sensorial mostraram diferenças significativas para os quesitos aparência, textura e sabor das amostras secas em estufa e as que utilizaram a secagem complementar com pulsos de vácuo. Estas últimas tiveram maior aceitação quanto à aparência, à textura e ao sabor.

Nunes (1997) estudou a eficiência da DO (com soluções de sacarose pura ou mistas de sacarose com glicerol) na redução da quantidade de exsudado para mangas submetidas a diferentes velocidades de congelamento. O autor concluiu que, no caso de exsudação, a DO promoveu proteção menos efetiva do que a secagem convectiva.

Martim (2006) estudou a cinética de DO com diversas soluções osmóticas compostas de sacarose e sorbitol, e adoçante composto por estévia, e após o pré-tratamento realizou secagem complementar em estufa. Os resultados demonstraram que, apesar do sorbitol promover uma perda de água maior do que a sacarose, ambos os solutos podem ser usados como agentes desidratantes.

Torezan (2005) pesquisou as variáveis de processo para mangas submetidas a pré-tratamento com DO seguido de fritura para a obtenção de manga *chips*. De maneira geral, o autor obteve *chips* de mangas com boa aceitabilidade, segundo análise sensorial, e com baixo teor de lipídeos e umidade, e alto teor de fibras.

### **1.3. PROCESSOS COMPLEMENTARES DE SECAGEM**

#### **1.3.1. Secagem solar**

A secagem ao sol é uma técnica antiga, na qual os alimentos colhidos são dispostos em camadas e expostos ao sol, fazendo uso da ação da radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade dos ventos para realizar a secagem dos alimentos (MUJUMDAR, 2007). É uma metodologia barata, em termos tanto de capital de investimento quanto de custos operacionais, como é também uma tecnologia não poluente, que utiliza principalmente uma fonte de energia abundante e renovável (BARBOSA-CÁNOVAS, 2000; FELLOWS, 2000;

MUJUMDAR, 2007). Não obstante, esta secagem apresenta algumas desvantagens com relação às tecnologias de secagem artificiais, como, por exemplo (BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO, 1996; MUJUMDAR, 2007):

- Dificuldade no controle de processo, podendo dar origem a uma excessiva secagem dos alimentos, ou germinação de alguns tipos de grãos;
- Inferioridade das taxas de secagem, resultando em produtos com grande variabilidade;
- Dependência da situação climática, a saber, o número de dias ensolarados por ano e a intensidade da radiação;
- Necessidade de maior força de trabalho em relação a outros métodos;
- Necessidade de maior controle contra contaminação por fungos, bactérias, roedores, pássaros e insetos.

Brandão et al. (2003) realizaram análises físico-química, microbiológica e sensorial em frutos de manga pré-tratados osmoticamente e em seguida secados ao sol, e concluíram que o produto final foi estável microbiologicamente e categorizado como alimento com teor de umidade intermediária, passível de ser utilizado como ingrediente para sobremesas.

Guiné et al. (2007) investigaram a cinética de secagem solar de algumas variedades de peras provenientes de Portugal. Os autores discutem que a partir dos resultados foi possível concluir que as variedades apresentaram comportamento similar durante a secagem, com ausência do período de taxa constante. Através dos dados experimentais os autores conseguiram prever a difusividade efetiva de acordo com a lei de Fick.

### 1.3.2. Secagem convectiva

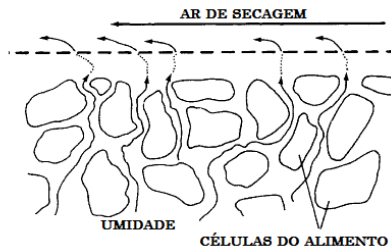
A secagem convectiva (SC) é um processo antigo usado para conservar os alimentos, no qual o produto a ser secado tem seu teor de umidade reduzido mediante a sua exposição a um fluxo contínuo de ar quente (RATTI, 2001). A SC é considerada um processo simultâneo de transferência de calor e massa acompanhado pela mudança de fase (FELLOWS, 2000).

O principal objetivo da secagem é estender a vida de prateleira (*shelf-life*) dos alimentos por meio da redução da atividade de água ( $a_w$ ),

consequentemente inibindo o crescimento microbiano e a atividade enzimática. Não obstante, a temperatura de processamento nem sempre é suficiente para ocasionar estas inativações, por isso qualquer aumento no teor de umidade durante o armazenamento, por exemplo, devido à embalagem defeituosa, irá resultar em rápida deterioração (FELLOWS, 2000).

No processo convectivo o calor fornecido pelo ar quente é transferido para o alimento, para garantir o calor latente necessário para que a água da superfície do produto evapore (Figura 1.3). Um gradiente de pressão de vapor de água é estabelecido a partir do interior úmido do alimento para o ar de secagem, representando a força motriz para a transferência de água.

Os mecanismos relacionados com o movimento da água no interior e exterior do alimento ocorrem através de forças capilares, da difusão da água devido aos gradientes de concentração, da difusão na superfície, da difusão do vapor de água nos poros ou ao fluxo devido aos gradientes de pressão e à vaporização-condensação do vapor da água (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2003; FELLOWS, 2000; BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO, 2000).



**Figura 1.3** – Representação esquemática do movimento da água durante a secagem (FELLOWS, 2000).

A capacidade do ar quente de remover a umidade presente no alimento é dependente de três fatores inter-relacionados: a umidade relativa (UR), a temperatura do ar e a vazão e velocidade do ar que passa sobre o alimento. O aumento na temperatura do ar ou a redução na UR ocasiona a evaporação mais rápida da água da superfície úmida (FELLOWS, 2000).

O teor de umidade do produto é definido como a relação entre a massa de água no alimento e a massa de sólidos secos, e se expressa na seguinte maneira (Equação 1.1):

$$X_t = \frac{(W_t - F_s)}{F_s} \quad (1.1)$$

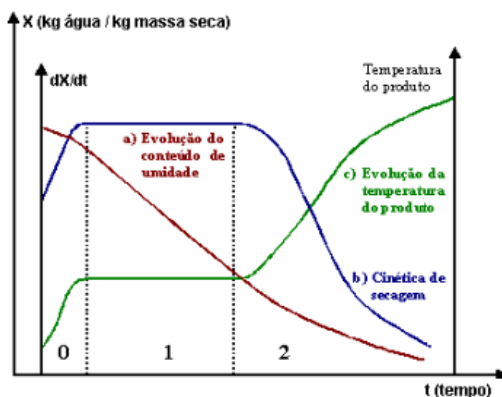
onde  $W_t$  é a massa total do material em um tempo determinado,  $F_s$  é massa de sólidos secos e  $X_t$  é o teor de umidade expresso em (massa de água/massa de sólidos secos). Nos processos de secagem, uma variável muito importante é o teor de umidade livre,  $X$ . O teor de umidade livre pode ser avaliado considerando-se o teor de umidade no equilíbrio (Equação 1.2):

$$X = X_t - X_{eq} \quad (1.2)$$

em que  $X_{eq}$  é o teor de umidade alcançado no equilíbrio com o ar de secagem. A taxa de secagem,  $R$ , é proporcional à variação do teor de umidade em função do tempo ( $t$ ) (Equação 1.3):

$$R \propto \frac{dX}{dt} \quad (1.3)$$

Na Figura 1.4 são apresentadas as curvas típicas de secagem, a curva da taxa de secagem, o teor de umidade pelo tempo e a evolução da temperatura do produto durante o processo.



**Figura 1.4** – Curvas típicas de secagem, taxa de secagem e temperatura do produto (PARK et al., 2001).

A curva *a* representa o teor de umidade em função do tempo de secagem; a curva *b* representa a velocidade ou taxa de secagem do produto com o tempo ( $dX/dt$ ), ou seja, diferenciando a curva *a* resulta na curva *b*; e a curva *c* representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (PARK et al., 2001).

Analisando-se o processo de secagem, percebe-se que o início desse processo é caracterizado pelo aumento gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Estas elevações ocorrem até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa, e inicia-se o período em que a velocidade de secagem é constante e a água livre do material é evaporada. Este período ocorre enquanto na superfície do produto houver quantidade de água suficiente para acompanhar a evaporação. Em seguida a taxa de secagem decresce, diminui a quantidade de água na superfície do produto e a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa, sendo que o fator limitante é a redução da migração da água do interior para a superfície do produto, que faz aumentar sua temperatura até atingir a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o teor de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem o processo é encerrado (PARK et al., 2001).

Outros fatores que influenciam a taxa de secagem incluem a composição e a estrutura do alimento. Por exemplo, altas concentrações de solutos como açúcares, sais, gomas, amidos, etc., aumentam a viscosidade e diminuem a atividade de água, reduzindo assim, a circulação de água. Da mesma forma, o teor de umidade é mais facilmente removido dos espaços intercelulares do que de dentro das células (FELLOWS, 2000)

A SC é indispensável para muitos setores da indústria de alimentos, porque aumenta a vida útil do produto final e reduz custos com embalagem, armazenamento e transporte. A SC também proporciona produtos convenientes para os consumidores e ingredientes de fácil manipulação para outros alimentos processados (BRENNAN, 1994; FELLOWS, 2000; LEWICKI, 2006).

Não obstante, devido às condições de processamento, a SC também apresenta algumas desvantagens, como o encolhimento e deformações no formato do produto, oxidação de pigmentos, perda de vitaminas, diminuição no valor nutricional e sensorial, baixa habilidade de reidratação do produto final, dentre outras (FELLOWS, 2000; LEWICKI, 2006). As desvantagens da SC são algumas das principais motivações para a realização de pesquisas que desenvolvam tecnologias alternativas para a preservação dos alimentos.

Os principais estudos realizados com secagem dizem respeito à avaliação das condições de processo. Park et al. (2001) determinaram as curvas de secagem para peras nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades de ar de 0,5, 1,0 e 1,5m/s. Através da análise dos resultados, os autores concluíram que os valores da difusividade aumentaram principalmente com o aumento da temperatura, e com a velocidade do ar de secagem; ou seja, com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da resistência interna de secagem.

Souza et al. (2003) realizaram um estudo para determinar os parâmetros do processo da desidratação osmótica de goiabas (a pressão atmosférica e a vácuo) seguida de secagem em estufa. Através das curvas de secagens, os autores constataram que ao final da secagem, para as amostras pré-tratadas com osmose a vácuo tiveram um tempo de secagem menor, mas, os produtos apresentaram maior escurecimento.

Vega et al., (2007) estudaram a cinética de secagem do pimentão vermelho (var. Lamuyo). Os resultados foram modelados para diferentes temperaturas de secagem (50, 60, 70 e 80°C), a velocidade do ar de secagem utilizado foi de 2,5m/s. Os autores observaram apenas o período decrescente da taxa de secagem. O efeito da temperatura na difusividade foi descrita pela equação do tipo Arrhenius, cujo resultado obtido para a energia de ativação foi de (Ea) 39,70 kJ mol<sup>-1</sup>. Foram feitas comparações dos valores experimentais com os valores calculados, os quais demonstraram que o modelo de Page modificado, dentre vários modelos testados, produziu o melhor ajuste para cada curva de secagem.

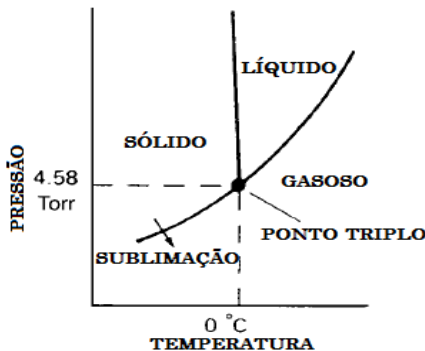
### 1.3.3. Liofilização

O processo de liofilização foi desenvolvido com o objetivo de desidratar materiais termo-sensíveis, sejam eles biológicos, farmacêuticos ou alimentícios (MUJUMDAR, 2007). A liofilização se baseia na desidratação por sublimação; dessa maneira, o processo é composto por duas fases: (1) a do congelamento do material, que deve ser rápido para que sejam formados pequenos cristais de gelo e em estado amorfo (MELLOR, 1978 apud BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO, 2000); (2) a da pressão do sistema, que é reduzida para que o gelo formado seja sublimado (MUJUMDAR, 2007).

A Figura 1.5 apresenta o diagrama de fases da água, observa-se pela figura que se a pressão de vapor de água de um alimento é mantida abaixo de 4,58 Torr (610,5 Pa ~ 6,1061659 mbar) e a água está congelada, desde que o alimento receba calor, o gelo se sublima

diretamente, sem ocorrer a sua fusão (FELLOWS, 2000; MUJUMDAR, 2007).

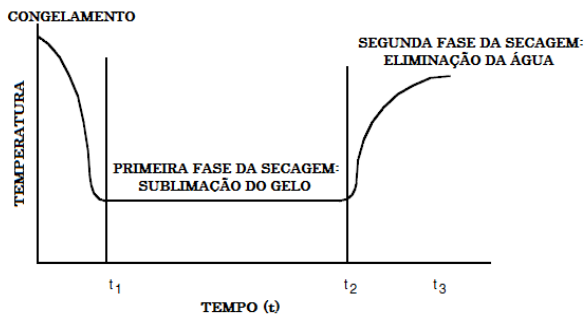
As duas fases do processo de liofilização podem ser distinguidas conforme observado na Figura 1.6. A primeira fase envolve a sublimação de gelo sob vácuo: o gelo sublima quando é fornecida a energia correspondente ao calor latente de sublimação. O vapor gerado na interface de sublimação é eliminado através dos poros do produto, devido à baixa pressão na câmara de secagem. Esse vapor deve passar por um condensador, o qual evita que o mesmo regresse ao produto, ao mesmo tempo em que reduz o trabalho de sucção da bomba de vácuo. A força motriz da sublimação é a diferença de pressão do vapor de água na interface do gelo e da pressão parcial de vapor de água na câmara de secagem. A energia necessária para sublimar o gelo pode ser fornecida por radiação, condução ou irradiação de moléculas de água com a utilização de micro-ondas (BARBOSA-CÁNOVAS e VEGAMERCADO, 2000; IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).



**Figura 1.5** – Diagrama de fases da água (FELLOWS, 2000).

A segunda etapa da liofilização começa quando o gelo no produto é removido e a umidade proveniente da água parcialmente ligada ao material está sendo seca. A taxa de aquecimento deve diminuir nesse momento, a fim de manter a temperatura do produto em torno de 30 a 50°C, o que impede que a estrutura do produto entre em colapso.





**Figura 1.6** – Diagrama com as etapas da liofilização (BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO, 2000).

Alimentos submetidos à liofilização preservam boa parte da qualidade sensorial e nutricional, e quando embalados e armazenados de forma adequada, a vida útil (*shelf-life*) pode ser consideravelmente estendida. Os componentes aromáticos não são arrastados e, como resultado, é possível reter de 80 a 100% do aroma natural, sendo que apenas um pequeno encolhimento é observado. A abertura dos poros da estrutura permite uma rápida e completa reidratação. No entanto, a estrutura porosa mais aberta pode permitir a entrada de oxigênio e provocar deteriorações oxidativas (FELLOWS, 2000).

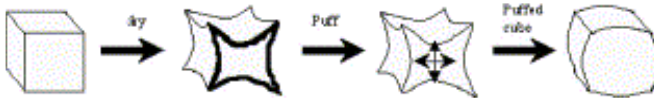
Marques et al. (2007) realizaram um estudo sobre a liofilização de acerolas, onde o produto final foi avaliado quanto à atividade de água, temperatura de transição vítrea, teor de vitamina C, encolhimento e capacidade de reidratação. Os autores concluíram que a liofilização da acerola contribuiu para a preservação da estrutura do produto, observando-se um encolhimento mínimo, alta capacidade de reidratação e alto teor de vitamina C.

Mata et al. (2005) estudaram o processo de liofilização de graviola seguido da maceração da mesma. O material liofilizado em pó e o liofilizado em forma de polpa foram analisados quanto ao teor de vitamina C, açúcares totais e redutores, acidez titulável, sólidos solúveis totais e pH. As amostras em pó foram reconstituídas e analisadas sensorialmente. Os resultados obtidos mostraram que a liofilização conservou grande parte das características sensoriais do produto, entretanto, em virtude do produto ter sofrido concentração, os valores nutricionais foram alterados.

### 1.3.4. Puff Drying

O *puffing* é um processo que envolve o desprendimento ou a expansão de gases nos produtos, tanto para criar-lhes uma estrutura interna, quanto para expandir e romper a estrutura existente (PAYNE et al., 1989). Segundo Payne et al. (1989), os processos de *puffing* são classificados em quatro categorias, baseadas no método responsável pela evolução do gás no interior do produto: mudança de fase, absorção, adsorção e reação química. Os mesmos autores afirmam que a mudança de fase é o método mais efetivo e mais comumente utilizado, devido à grande variação de volume associada à mudança de mesma.

O princípio da expansão pelo vapor é baseada na “autovaporização” do teor de umidade do alimento. Isto ocorre para produtos em sistemas pressurizados, que sofrem repentinamente uma depressurização (LOUKA e ALLAF, 2004). Na Figura 1.7 está um representado um esquema do mecanismo do processo de *puffing*.



**Figura 1.7** – Representação esquemática do mecanismo de *puffing* (VARNALIS et al., 2001).

O *explosion-puffing* é o processo mais conhecido desse método, segundo Sullivan et al. (1965), citado por Luccas, (1996). Nesse processo, o produto parcialmente desidratado é acondicionado em uma câmara fechada e pressurizada pelo aquecimento interno com vapor superaquecido ou outra fonte. Com o aumento da pressão, a água contida no alimento atinge temperaturas superiores às de ebulição. Em seguida, a câmara é subitamente depressurizada, fazendo com que a água superaquecida sofra uma evaporação *flash*. Durante esta fase o produto sofre uma transformação adiabática irreversível. A quantidade de vapor gerada está estritamente relacionada com a diferença de temperatura entre as duas fases, a anterior e posterior à decompressão (LOUKA e ALLAF, 2002). Dessa maneira, um produto com comportamento viscoelástico, quando submetido a altas temperaturas, expande-se sob o efeito das ações mecânicas geradas pelo vapor criado, originando uma estrutura porosa no produto (LOUKA e ALLAF, 2004).

Após esse processo, o produto passa novamente por um processo de secagem para que seja alcançado o teor de umidade final desejado.

É importante salientar que o produto deve ser adequadamente preparado para o processo de expansão, particularmente pela suas propriedades reológicas, as quais são principalmente determinadas pela temperatura e pelo teor de água. Por outro lado, o teor de umidade está relacionado com a quantidade de vapor gerado durante a fase de descompressão, e grandes quantidades de vapor podem desintegrar o produto, dificultando sua expansão. Consequentemente recomenda-se que seja realizada uma pré-secagem antes da aplicação do processo de *puffing* (LOUKA e ALLAF, 2002).

Pesquisadores da Universidade de La Rochelle, na França, propuseram uma variação ao processo tradicional de *puffing* em que a descompressão é acompanhada pela aplicação de vácuo no sistema, ao invés de se realizar este processo somente até a pressão atmosférica, como no método tradicional. O novo processo foi chamado de “*Controlled Sudden Decompression*” (Descompressão Repentina Controlada). Segundo os autores, o vácuo contribui para que a diferença de temperatura seja maior entre a pressurização do sistema e a aplicação do vácuo. Além disso, a temperatura final de equilíbrio é próxima da temperatura de saturação da água (por exemplo, a 0,05 bar a temperatura de saturação da água é de 30°C). Assim, a quantidade de vapor gerada é suficientemente grande. Os autores propõem o uso de temperaturas de tratamento mais brandas (por exemplo, de 150°C a 30°C ao invés de 220°C a 100°C, como na descompressão até pressão atmosférica) (LOUKA e ALLAF, 2002, 2004; LOUKA et al., 2004).

#### **1.4. PARÂMETROS DE QUALIDADE DE FRUTAS DESIDRATADAS**

A deterioração dos alimentos é um processo diretamente ligado com o teor de água do mesmo, uma vez que a água é um dos principais constituintes da maioria dos alimentos, afetando sua estabilidade e textura, e participando de reações químicas e do crescimento microbiano. Por isso, o teor de umidade e a atividade de água ( $a_w$ ) são parâmetros importantes para o controle de qualidade de alimentos (FELLOWS, 2000; HOGAN et al., 2005; MUJUMDAR, 2007).

### 1.4.1. Teor de umidade e atividade de água

O teor de umidade dos alimentos pode ser expresso em base seca, conforme a Equação 1.4 (STRUMILLO e KUNDRÁ, 1986):

$$X_{BS} = \frac{m_a}{m_{ss}} \quad (\text{kg de água/kg de sólidos secos}) \quad (1.4)$$

onde,  $X_{BS}$  é o teor de umidade em base seca,  $m_a$  é a massa de água e  $m_{ss}$  é a massa de sólidos secos presentes no alimento.

A umidade pode ser expressa também em base úmida (Equação 1.5):

$$X_{BU} = \frac{m_a}{m_T} = \frac{m_a}{m_a + m_{ss}} \quad (\text{kg de água/ kg de sólidos úmidos}) \quad (1.5)$$

onde,  $X_{BU}$  é o teor de umidade em base úmida,  $m_a$  é a massa de água, e  $m_{ss}$  é a massa de sólidos secos presentes no alimento e  $m_t$  é a massa total do alimento.

De forma geral, somente a análise do teor de umidade de um alimento não é suficiente para prever sua estabilidade, pois alguns alimentos são instáveis mesmo apresentando baixos teores de umidade. Dessa maneira, é importante que juntamente com o teor de umidade seja também avaliada a disponibilidade da água no alimento, ou seja, seu estado termodinâmico, que é expresso em termos de atividade de água (FELLOWS, 2000; MUJUMDAR, 2007).

A atividade de água pode ser definida como a razão entre a pressão de vapor da água no alimento ( $P$ ) e a pressão de vapor da água pura ( $P_0$ ) na mesma temperatura, conforme a Equação (1.6) (FELLOWS, 2000):

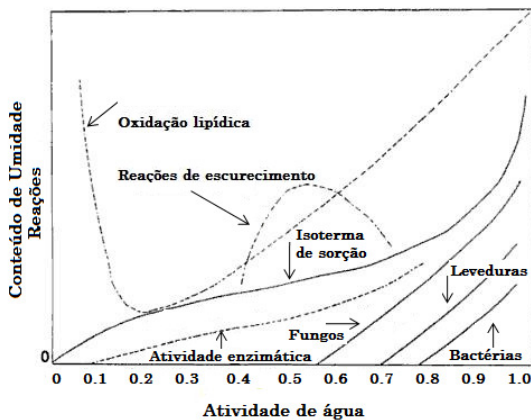
$$a_w = \left[ \frac{P}{P_0} \right]_{P,T} \quad (1.6)$$

onde,  $a_w$  é a atividade de água,  $P$  é a pressão de vapor da água no alimento e  $P_0$  é a pressão de vapor da água pura.

A Equação (1.6) pressupõe que o alimento esteja em equilíbrio com a atmosfera circundante. Desde que a maioria dos processamentos de alimentos é realizada em condições isobáricas e em temperaturas

moderadas, o desvio de comportamento do vapor de água com relação ao comportamento de gás ideal é pequeno e a atividade de água calculada a partir da equação acima difere menos de 0,5% do valor termodinâmico (LEWICKI, 2004).

Os valores de atividade de água que limitam o crescimento da grande maioria das bactérias patogênicas são inferiores a 0,90, enquanto para os fungos recomenda-se que o valor de atividade de água esteja abaixo de 0,70, e de modo geral, o limite inferior para todos os microorganismos é  $a_w < 0,60$ . Além do crescimento microbiano, os alimentos também são passíveis de sofrer oxidação, escurecimento não enzimático (reações de Maillard), como também podem ocorrer reações enzimáticas, mesmo com baixos valores de  $a_w$ , conforme pode ser observado na Figura 1.8 (FELLOWS, 2000; BAKER, 1997).



**Figura 1.8** – Relação da taxa de deterioração de alimentos em função da atividade de água (BAKER, 1997).

A redução da atividade de água pode ser obtida de duas maneiras: removendo-se a água por secagem, evaporação ou liofilização, ou imobilizando-se a água no alimento pela adição de umectantes (depressores da  $a_w$ ), como açúcares, sais e glicerol. Como a redução de  $a_w$  em 0,1 unidade necessita da adição de grande quantidade desses aditivos, a desidratação se apresenta como a técnica de conservação mais eficaz para alimentos com alto teor de umidade (BAKER, 1997; FELLOWS, 2000; MUJUMDAR, 2007).

### 1.4.2. Propriedades mecânicas – Textura

A tendência dos consumidores ao comprar um alimento é de avaliar a aparência, os atributos sensoriais e nutritivos e a textura, dada a ligação destes parâmetros com a aceitabilidade sensorial (BOURNE, 2002; ROUDAUT et al., 2002). Segundo Bourne (2002), outros fatores, como custo, conveniência e tipo de embalagem são também importantes, mas não são considerados fatores de qualidade dos alimentos.

Devido à relevância da textura para a aceitabilidade sensorial de um produto, é cada vez maior a preocupação, tanto por parte do meio acadêmico quanto da indústria, em desenvolver e aprimorar os métodos instrumentais para quantificar a textura, por serem eles, geralmente, mais rápidos quando comparados com a análise sensorial (PELEG, 2006).

Apesar da análise sensorial apresentar resultados com descrições mais completas, principalmente tratando-se de textura, as vantagens da análise instrumental são a rapidez e a flexibilidade. As sondas, as células de carga e as condições de ensaio podem ser adaptadas para uso em uma ampla variedade de alimentos. Essa versatilidade é uma característica importante para indústrias que manipulam variados tipos de alimentos (KILCAST, 2004; ROUDAUT et al., 2002). A maioria dos métodos instrumentais de avaliação de textura são realizados por meio de ensaios mecânicos (PELEG, 1987).

Por outro lado, existem algumas dificuldades no estabelecimento da relação entre a percepção da textura e as propriedades físicas dos alimentos, das quais uma das principais é o fato de que a maioria dos alimentos é altamente anisotrópica, ou seja, não são uniformes, resultando em propriedades mecânicas diferentes em distintas direções (longitudinal, transversal) do alimento. Além disso, os alimentos são quimicamente ativos e fisicamente instáveis (PELEG, 1987).

A crocância é um termo de difícil definição, por não apresentar um significado exato (FILLION e KILCAST, 2002; PELEG, 2006; DIJKSTERHUIS, et al., 2007), embora exista um consenso geral de que a sensação sensorial da crocância está relacionada com às propriedades de fratura dos alimentos (VICENT, 1998; DIJKSTERHUIS, et al., 2007).

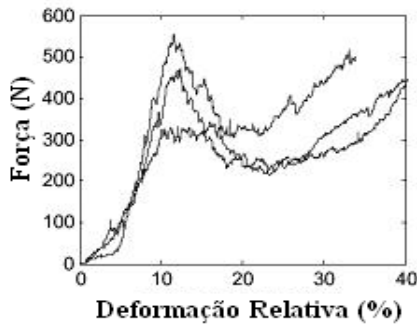
Para um produto ser crocante, em termos físicos, deve apresentar uma estrutura firme, mas ao mesmo tempo frágil, para que, ao ser submetido a uma força, ocorra a fratura e ele se desintegre

(DIJKSTERHUIS, et al., 2007). O som emitido ao mastigar um alimento crocante é outro fator que contribui na concepção de alimento crocante (ROUDAUT et al., 2002; DIJKSTERHUIS et al., 2007). Fillion e Killcast (2002), em seu estudo sobre a percepção da crocância de frutas e vegetais pelo consumidor, mostraram que alguns julgadores associaram o som da crocância com o caminhar sobre folhas secas e cascalhos.

A perda de crocância, principalmente em alimentos secos, deve-se à adsorção de umidade. A água afeta a textura dos alimentos secos através do amaciamento e plastificação da matriz protéica, que a altera a resistência mecânica do produto (CARDOSO, 1998).

Os testes mais comuns para avaliar a crocância de um alimento podem ser categorizados em três grupos: curvatura (*flexure*), cisalhamento (*shear*) e testes de compressão. Este último é o mais usado, pela similaridade com o processo da mastigação humana. Testes de penetração (*puncture tests*) também têm sido amplamente utilizados, por simularem o impacto incisivo de uma mordida. Neste caso, uma sonda cilíndrica ou cônica de pequeno diâmetro perfura e penetra a amostra a uma velocidade constante e relativamente baixa. Independentemente do tipo de sonda ou método utilizado, os ensaios baseiam-se no registro da força quando uma determinada deformação é aplicada ao produto (ROUDAUT et al., 2002).

Os ensaios mecânicos de produtos crocantes, como frutas secas e cereais matinais, apresentam curvas de força por deformação relativa ou por tempo, caracterizados por curvas ruidosas com picos, onde a força oscila devido à quebra da parede celular e à desintegração da estrutura, conforme pode ser observado na Figura 1.9 para ensaios mecânicos em cereais matinais (LAURINDO e PELEG, 2007). Outras curvas de produtos crocantes podem ser encontradas em Laurindo e Peleg (2008). Esses autores utilizaram o conceito de dimensão fractal para representar o nível de crocância.



**Figura 1.9** – Curvas de força-deformação relativa de amostras de cereais matinais submetidas a ensaios de mecânicos (LAURINDO e PELEG, 2007).

### 1.4.3. 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 apud KROKIDA et al., 1999).

A capacidade ou grau de reidratação refere-se à quantidade de água que o produto consegue absorver durante a imersão, sendo um importante parâmetro para produtos que serão utilizados após completa reconstituição (TAIWO et al., 2002). A reidratação é influenciada por vários fatores, tais como a composição química do produto, pré-tratamentos, a formulação do produto, técnicas e condições de secagem, procedimentos pós-secagem, etc. (OLIVEIRA e ILINCANU, 1999 apud DEBNATH et al., 2004).

O grau e a taxa de reidratação são dois parâmetros importantes de avaliação em ensaios de reidratação. A taxa geralmente diminui com o tempo de imersão, e os valores iniciais são muito importantes para caracterizar os produtos que serão submetidos a períodos curtos de imersão, como é o caso dos cereais matinais. Neste caso, é desejável



uma baixa taxa de reidratação para que o produto mantenha sua característica de crocância antes do consumo.

Luccas (1996) determinou o grau de reidratação de banana-prata desidratada por secagem convectiva e por secagem em dois estágios, usando altas temperaturas em curto tempo (*High temperature short time*) seguidas de uma etapa a 70°C. O autor obteve um alto índice de reidratação das amostras secas em dois estágios.

## 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 (1.7):

$$\vec{J}_A = -D \cdot \vec{\nabla} C_A \quad (1.7)$$

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 ( $\epsilon$ ) e a tortuosidade ( $\tau$ ) (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 especial da concentração do componente  $A$  em função do tempo, é dada por:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \underbrace{\vec{\nabla}^2 \cdot D_{ap} \cdot C_A}_{\text{Contribuição difusiva}} - \underbrace{\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \cdot C_A}_{\text{Contribuição convectiva}} \quad (1.8)$$

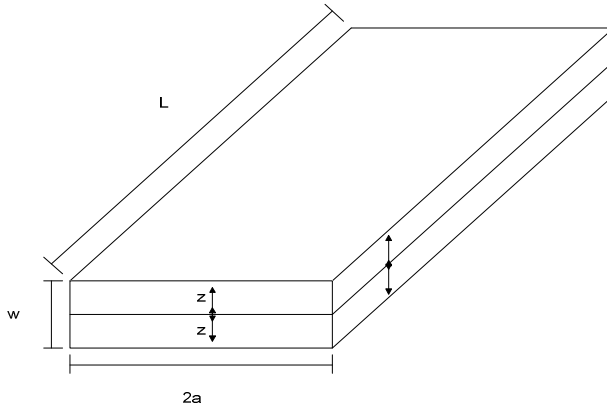
onde  $C_A$  é a concentração mássica do componente  $A$ ,  $D_{ap}$  é a difusividade aparente e  $v$  é a velocidade do componente  $A$  na matriz (BIRD et al., 1960). Quando se trabalha com sólidos porosos, ou mesmo

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).

Em muitos casos, a Equação (1.8) 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 1.8, considerando apenas a contribuição difusiva em sólidos de geometrias clássicas (placa plana infinita, cilindro infinito e esfera).

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 1.10.



**Figura 1.10** – Ilustração da geometria da placa plana infinita.

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

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (1.9)$$

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.

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:

$$\bar{C}_A(t) = \frac{1}{a} \int_0^a C_A(z, t) dz \quad (1.10)$$

Assim, a Equação que representa a variação da concentração média em função do tempo é dada por 1.11:

$$\frac{\bar{C}_A - C_A^*}{C_{A_0} - C_A^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - \left( \frac{(2n+1)\pi}{2a} \right)^2 D_{ef} t \right] \quad (1.11)$$

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 (1.11) em termos dos números adimensionais, tem-se que:

$$\bar{Y} = \bar{Y}(F_{oM}) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\gamma_n^2} e^{(-\gamma_n^2 F_{oM})} \quad (1.12)$$

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

$$\gamma_n = (2n+1) \frac{\pi}{2} \quad (1.13)$$

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:

$$F_{oM} = \frac{D_{ef} t}{z_1^2} \quad (1.14)$$

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