

BERNARDO ALBERTO MARCUSSI

**DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA E IMPREGNAÇÃO A VÁCUO
DE PÊRA (variedade Buerre D´Anjou)**

Florianópolis – SC

2005

BERNARDO ALBERTO MARCUSSI

**DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA E IMPREGNAÇÃO A VÁCUO
DE PÊRA (variedade Buerre D´Anjou)**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Ribeiro de Souza

Florianópolis, fevereiro de 2005.

“Desidratação osmótica e impregnação a vácuo de pêra (variedade Buerre D`Anjou)”

Por

Bernardo Alberto Marcussi

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. José Antonio Ribeiro de Souza
Orientador

Profa. Dra. Gláucia M. Falcão de Aragão
Coordenadora da CPGEA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Borges Laurindo

Prof. Dr. José Alexandre Borges Valle

Florianópolis, 23 de fevereiro de 2005.

*Dedico esta obra às pessoas que
sempre estiveram ao meu lado,
em especial, aos meus pais.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** pela força sempre presente em minha vida.

Ao meu Pai Osvaldo Aparecido Marcussi, por seu apoio, dedicação, me incentivando, para que nunca me deixasse ser vencido pelos desafios da vida.

A minha Mãe Maria de Fátima Valentim Alberto de Mendonça, por seu discernimento, amor e ternura apaziguando meu coração nos momentos mais difíceis.

A minha namorada Adriana Paula Slongo, pelo amor, apoio, paciência e compreensão e pelo incentivo sempre presente.

A minha linda e querida irmãzinha **Maria Carolina** e aos meus queridos irmãos **Rafael** e **Gustavo**, tenham a certeza de que meu amor por vocês é infinito, e que podem contar comigo sempre.

A todos os demais membros das famílias **Alberto, Marcussi, Rodrigues** e **Pontes**, obrigada pelo apoio especialmente nos momentos difíceis pelos quais passamos e pelos laços de amor que sempre são manifestados e estão sempre presentes mesmo de longe.

Ao meu orientador, prof. José Antonio Ribeiro de Souza.

Aos membros da banca examinadora: prof. João Borges Laurindo e prof. José Alexandre Borges Valle.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	I
LISTA DE TABELA	II
NOMENCLATURA	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	2
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA	6
2.2 - MECANISMO HIDRODINÂMICO - HDM	30
2.2.1 - ACOPLAMENTO DOS FENÔMENOS DE DEFORMAÇÃO – RELAXAÇÃO (DRP) AO MECANISMO HIDRODINÂMICO (HDM).	34
2.3 - PÊRA ARGENTINA	39
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 – EQUIPAMENTO	44
3.2 – SOLUÇÕES UTILIZADAS	45
3.3 – PÊRA ARGENTINA	46
3.4 – TRATAMENTOS	46
3.4.1 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA	46
3.4.2 – IMPREGNAÇÃO A VÁCUO: VISUALIZAÇÃO COM AZUL DE METILENO	47
3.4.3– IMPREGNAÇÃO A VÁCUO: SOLUÇÃO ISOTÔNICA E SUÇO	48
3.5 – ANÁLISES	48
3.5.1 – DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS (DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA)	48
3.5.2 – ANÁLISE VISUAL (IMPREGNAÇÃO A VÁCUO COM AZUL DE METILENO)	49
3.5.3– DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DO VOLUME IMPREGNADA (X) E DA FRAÇÃO DO VOLUME DOS POROS IMPREGNADA (X _v) (IMPREGNAÇÃO A VÁCUO COM SOLUÇÃO ISOTÔNICA E COM SUÇO)	49
3.5.4– DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E DAS DENSIDADES REAL E APARENTE	49
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
ARTIGO 1	49
DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA A VÁCUO DE FRUTAS	49
DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA A VÁCUO DE FRUTAS	54
ARTIGO II	71
IMPREGNAÇÃO A VÁCUO DE FRUTAS	71

<u>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	<u>90</u>
<u>CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>94</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>98</u>

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 - Fenômenos de transferência de massa em sistema multicomponente de migração de desidratação osmótica a vácuo de frutas (SHI & FITO, 1993).	7
Figura 2.2 – O comportamento da perda de água das amostras de abricó, em diferentes tratamentos (solução de açúcar: 65°Brix; vácuo: 100 mb) (SHI & FITO, 1993).	9
Figura 2.3 – Perda de água em fatias de maçã em desidratação osmótica a 50°C; pressão atmosférica (A), vácuo (V).	10
Figura 2.4 – Perda de água em fatias de maçã em desidratação osmótica a 60°C; pressão atmosférica (A), vácuo (V).	10
Figura 2.5 – Os estágios típicos em uma operação de transferência de massa num alimento poroso imerso em um líquido, a vácuo. Situação de um poro ideal (FITO, 1994).	12
Figura 2.6 – Fruta em sistema de contato de três fases (atmosfera-fruta-solução) (SHI & FITO, 1994).	14
Figuras 2.7 – Fruta em sistema de contato de duas fases (SHI & FITO, 1994).	14
Figuras 2.8 – Fruta em contato com solução e com atmosfera, durante processo de desidratação osmótica a vácuo (sistema de três fases de contato, fruta-solução-atmosfera) (SHI & FITO, 1994).	6
Figura 2.9 – A ascensão capilar sob pressão normal e sob vácuo (SHI & FITO, 1994).	15
Figura 2.10 – Valores experimentais de x em função de x_v , onde: x é a fração do volume da fruta impregnada pela solução e x_v é a fração do volume dos poros da fruta impregnada pela solução (FITO & PASTOR, 1994).	19
Figura 2.11 – Valores experimentais de x em função de x_v , para diferentes frutas testadas onde x é a fração do volume das frutas impregnada pela solução e x_v é a fração do volume dos poros das frutas impregnada pela solução (FITO & PASTOR, 1994).	20
Figura 2.12 – Valores de porosidade efetiva em diferentes pressões para cada fruta (FITO, 1994).	21
Figura 2.13 – Os diferentes comportamentos de ganho de açúcar nos diferentes tipos de frutas sob as mesmas condições de desidratação osmótica (solução de açúcar: 65°Brix, 40°C; vácuo: 100 mbar) (SHI & FITO, 1993).	24
Figura 2.14 – Comportamento de transferência de massa de abricós em desidratação osmótica (solução de açúcar: 65°Brix; vácuo: 10000 Pa) (SHI & FITO, 1994).	25
Figura 2.15 – Ganho de açúcar e perda de água como funções da raiz quadrada do tempo para desidratação osmótica a pressão atmosférica (DO) e a pulso de vácuo (PVDO) realizados com soluções de sacarose a diferentes concentrações. (GIRALDO et al., 2003).	26
Figura 2.16 – O comportamento de perda de água de amostras de abricós, em tratamentos diferentes (solução de açúcar: 65°Brix; vácuo: 100 mb) (SHI & FITO, 1993).	28
Figura 2.17 – Esquema de atuação do HDM em um poro (FITO & PASTOR, 1994).	31
Figura 2.18 – Valores de x_v segundo a equação (2.11), para diferentes valores de p_r e R (FITO & PASTOR, 1994).	33
Figura 2.19 – Sistema sólido-líquido: evolução da Relaxação-Deformação e HDM, em um poro ideal (FITO et al., 1996).	35
Figura 2.20– Importação brasileira de frutas, em toneladas, segundo a FAO e o MDIC, 2004.	40
Figura 2.21 – Importação brasileira de peras, em toneladas, segundo a FAO e o MDIC, 2004.	41
Figura 3.1 – Equipamento usado nas operações sólido-líquido.	45
Figura A1 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 10 mmHg durante (a) 10 minutos e (b) 15 minutos.	99
Figura A2 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 10 mmHg durante (a) 30 minutos e (b) 40 minutos.	99
Figura A3 – Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 10 mmHg durante (a) e (b) 60 minutos.	100
Figura A4 – Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 10 mmHg durante (a) 80 minutos e (b) 90 minutos.	100
Figura A5 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante (a) 10 minutos e (b) 20 minutos.	101
Figura A6 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante (a) 30 minutos e (b) 45 minutos.	101
Figura A7 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante (a) 60 minutos e (b) 90 minutos.	102
Figura A8 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas ao meio antes do tratamento a 10 mmHg durante (a) 5 minutos e (b) 15 minutos.	102
Figura A9 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas ao meio antes do tratamento a 10 mmHg durante (a) 30 minutos e (b) 60 minutos.	103

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 - Algumas propriedades físico-químicas e respostas à impregnação a vácuo de algumas frutas.	22
Tabela 2.2 – Parâmetros cinéticos para a perda de água ΔM_w e para ganho de açúcar ΔM_s obtidos da regressão linear dos dados como uma função da raiz quadrada do tempo (k: coeficiente angular; k^0 : coeficiente linear; e R^2 das retas ajustadas).	27
Tabela 2.3 – Importação brasileira de frutas, em toneladas, segundo a FAO e o MDIC, 2004.	40
Tabela 2.4 – Importação brasileira de frutas, em dólares segundo a FAO e o MDIC, 2004.	42

NOMENCLATURA

σ	Tensão superficial
μ	Viscosidade
γ	Deformação por unidade de volume
ε_e	Porosidade efetiva
v_g	Volume do gás contido no interior do poro ideal
γ_j	Deformação por unidade de volume
Δp	Gradiente de pressão
D	Diâmetro
p_1	Pressão de vácuo
p_2	Pressão do sistema
p_c	Pressão capilar
p_e	Pressão exterior
p_i	Pressão interna do gás
p_{i0}	valor inicial da pressão do gás
p_r	Pressão capilar reduzida
r_j	relação de compressão real
R_j	Relação de compressão aparente
t_j	Tempo
V_o	Volume inicial da amostra
V_{go}	Volume total de gás na amostra em (t = 0).
x	Fração do volume inicial da amostra impregnada
x_v	Fração do volume inicial dos poros impregnados
x_c	Deformação da matriz sólida
\mathcal{E}_{et}	Porosidade efetiva em qualquer instante
V_p	Volume de poros do alimento em qualquer instante
V_{of}	Volume inicial da fruta
V_{op}	Volume inicial dos poros da fruta
V_{oms}	Volume inicial da matriz sólida

M_1	Massa da matriz sólida desgaseificada
M_g	Massa de gás originalmente presente na amostra
V_2	Volume da amostra
Y	Dimensionless real number
ρ	Densidade aparente
ρ_r	Densidade real

RESUMO

Os fenômenos de transferência de massa que ocorrem quando alimentos sólidos são imersos em soluções são de vital importância para a concepção de produtos alimentícios e têm sido focados por diversas pesquisas. Nos últimos anos, diferenças fenomenológicas causadas pela aplicação de vácuo nesses processos vêm sendo relatadas por alguns desses estudos. Aumentos e diminuições na perda de água e aumentos no ganho de solutos foram reportados em processos de desidratação osmótica, através de reduções na pressão desses sistemas. Incorporações de solutos em alimentos têm sido apresentadas e apontadas como um novo recurso tecnológico para o desenvolvimento de novos produtos e processos como, por exemplo, alimentos funcionais. Um modelo hidrodinâmico de impregnação a vácuo que procurou descrever as trocas de matéria que ocorrem devido às mudanças de pressão foi descrito na literatura. Nesta pesquisa, os efeitos da aplicação de vácuo sobre os fenômenos de transferência em processos de desidratação osmótica de peras foram estudados em dois níveis de temperatura. Três tipos de tratamento, desidratação osmótica a pressão atmosférica (DO), desidratação osmótica a pulso de vácuo (DOPV) e desidratação osmótica a vácuo (DOV) foram conduzidos onde as pressões atmosférica e 2,7 kPa (pressão absoluta) foram usadas de diferentes maneiras. Solução de sacarose a 60°Brix foi empregada como agente osmótico cujas temperaturas foram 30°C e 40°C e no qual as fatias de pêra permaneciam imersas por 15, 30, 45, 60, 120, 180 e 240 minutos. A aplicação de vácuo contínuo nos tratamentos de desidratação osmótica a vácuo (DOV) sempre implicou em perdas maiores de água. Contudo, reduções menores nos teores de água foram observadas nos tratamentos de desidratação osmótica a pulso de vácuo, em relação às operações a pressão atmosférica. Ganhos de solutos maiores foram notados com a aplicação de vácuo de ambas as maneiras. A atividade de água decaiu mais rapidamente nos processos de desidratação osmótica a vácuo (DOV) que a pressão atmosférica. Entretanto, a aplicação de vácuo nos processos de desidratação osmótica a pulso de vácuo (DOPV) a 30°C diminuiu a queda da atividade de água. O oposto foi observado a 40°C.

Ainda foi estudado, nesta pesquisa, o comportamento da pêra argentina perante a impregnação a vácuo, visando verificar a aplicação do modelo hidrodinâmico. Ocorre divergência nos valores de porosidade de pêra apresentados na literatura. Recentemente, a comparação entre a porosidade efetiva e aquela calculada a partir das densidades real e aparente do produto foi apresentada na literatura. Assim, as porosidades efetivas e a obtida a partir das densidades foram determinadas e comparadas. O comportamento de impregnação foi verificado usando-se duas fases líquidas, solução isotônica de sacarose e suco da fruta, o que também não foi encontrado na literatura. Com isso, procurou-se verificar possíveis diferenças quanto as respostas e aos valores de porosidade. O HDM explicou satisfatoriamente os fenômenos de impregnação em pêra argentina e um ajuste melhor de dados ao modelo, do que os encontrados na literatura, foi conseguido. Provavelmente a faixa mais baixa de pressão usada nesta pesquisa contribuiu para isso, como previsto pela teoria. A porosidade efetiva determinada foi muito próxima à porosidade obtida através das densidades real e aparente. Foi feita também uma pesquisa qualitativa a cerca dos fenômenos a vácuo e a pressão atmosférica usando solução colorida de azul de metileno. A presença do corante não foi notada no interior das frutas tratadas a pressão atmosférica. Todavia, com 5 minutos de tratamento a vácuo (1,33kPa de pressão absoluta), observou-se uma intensa colorização das frutas. A presença do corante nas partes mais internas das amostras tratadas a vácuo revelou interligação entre os poros de pêra argentina.

ABSTRACT

Mass transfer phenomena, which occur when solid foods are immersed in solutions, have vital importance to the development of food products and have highlighted in many researches. In the last years, phenomenological differences caused by vacuum application in these processes have been reported by some of these studies. Water loss increase and decreases and solute gain increases have been reported in osmotic dehydration processes through pressure reductions in these systems. Solute uptake in food have been reported and pointed out as a new technological resource for development of new products and processes, for instance, functional foods. A hydrodynamic model of vacuum impregnation, which is an attempt to describe the matter exchanges that occur due to the pressure changes, has been described in the literature. In this research, vacuum application effects on the transfer phenomena in pear osmotic dehydration operations have been studied in two temperature levels. Three kinds of treatments, atmospheric pressure osmotic dehydration (DO), pulse vacuum osmotic dehydration (PVOD) and vacuum osmotic dehydration (VOD) were carried out in which atmospheric pressure and 2.7 kPa (absolute pressure) were employed in different ways. Sucrose solutions at 60°Brix, was employed as osmotic agent whose temperatures were at 30°C and 40°C and in which pear slices were kept immersed during 15, 30, 45, 60, 120, 180 and 240 minutes. The application of continuous vacuum in the vacuum osmotic dehydration (VOD) treatments always gave rise to higher water losses. However, smaller reductions in the moisture contents were observed in the pulse vacuum dehydration (PVOD) treatments, compared with the atmospheric pressure operations. Higher solute uptakes were noticed with the vacuum applications by both ways. Water activity diminished more quickly in the vacuum osmotic dehydration (VOD) processes than at atmospheric pressure. However, the vacuum application in the pulse vacuum osmotic dehydration (PVOD) processes at 30°C diminished water activity drop. The opposite happened at 40°C. In this work, the argentine pear (variety Buerre D'Anjou) behavior during vacuum impregnation (VI) has been still studied so as to verify the hydrodynamic mechanism (HDM) application. The pear effective porosity values presented in the literature diverge. Recently, the comparison between effective porosity and the one calculated from the product real and apparent densities have been proposed in the literature. Thus, the effective porosity and the one obtained from densities were determined and compared in this research. In this, study, the impregnation behavior was researched using two liquid phases. Isotonic sucrose solution and fruit juice, what was not found in the literature. In this way, it was made an attempt to verify possible differences concerning these responses and the porosity values. The hydrodynamic mechanism has explained satisfactorily the impregnation phenomena in argentine pear and a better data fit, than those which were found in the literature, were reached. Probably, the lower pressure range used in this research responsible for this, as well as predicted by theory. The determined effective porosity was very close to the porosity obtained from the real and apparent densities. A qualitative research has also been carried out regarding the vacuum and atmospheric pressure phenomena using blue methylene coloured solution. The colouring presence was not noticed in the inner part of the treated at atmospheric pressure. However, at 5 minutes of vacuum treatment (1.3 kPa, absolute pressure), it was observed that the samples coloured. The colouring presence in the deep inner part of the fruit treated at vacuum pointed out that the argentine pear pores should be liked up.

***CAPÍTULO I –
INTRODUÇÃO***

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Os fenômenos de transferência de massa estão amplamente presentes nos diversos processos, nas indústrias de alimentos. Dentre eles, destaca-se a desidratação osmótica de frutas que é reconhecida como um processo para se obter produtos de frutas de melhor qualidade (SHI & FITO, 1994). Esta é baseada na imersão de frutas em uma solução hipertônica de açúcar (SHI & FITO, 1994). Neste caso, ocorrem dois fluxos simultâneos em contracorrente: a saída da água da matriz do alimento sólido e a entrada do soluto desejado no produto (SALVATORI et al., 1999). É uma operação que demanda contato prolongado entre as fases líquida e sólida.

Nos últimos anos, (MATA, 1991; MATA & FITO, 1992; PASTOR et al., 1992 a,b; SHI & FITO, 1993; SHI & FITO, 1994; SHI et al., 1995) muitos trabalhos têm apresentado a aplicação de vácuo nos processos de desidratação osmótica, como alternativa para diminuir o tempo de contato necessário entre essas fases. A diminuição da pressão do sistema causa saída de parte do ar do interior do alimento. O restabelecimento subsequente da pressão atmosférica gera a entrada da solução que circunda o alimento em seu interior. Esse processo ficou conhecido como impregnação a vácuo. Considerando a estrutura porosa da grande maioria dos alimentos e a presença de ar no seu interior, Fito e Pastor (1994) sugeriram um modelo físico, para descrição do processo de impregnação a vácuo de um meio poroso, que foi denominado mecanismo hidrodinâmico (HDM). Num primeiro instante, o HDM contribui para o transporte total, de maneira muito mais significativa, quando se trabalha sob vácuo. Num segundo momento, os outros mecanismos (difusivo e osmótico) têm uma superfície de interface maior devido a maior ocupação da superfície interna dos poros (FITO & PASTOR, 1994). Além disso, um outro fato que explica a aceleração do processo de desidratação, quando sob vácuo, é que, nesta condição, a taxa de transferência total de água resulta da combinação da difusão fickiana tradicional com o fluxo capilar a vácuo segundo Shi e Fito (1993). Há que se considerar, ainda, que a operação de impregnação a vácuo nos permite incorporar ingredientes em um produto poroso, a fim de adaptar sua composição a certos requisitos de qualidade e estabilidade, de uma maneira rápida e simples (FITO et al., 2001). Desta forma a incorporação de ácidos, conservantes, açúcares, nutrientes especiais, depressores de atividade de água e outros se

faz possível. Assim, a impregnação a vácuo se revela como um recurso para o desenvolvimento de produtos de frutas e de vegetais (CHIRALT et al., 1999).

A microestrutura do alimento, a porosidade, o tamanho, a distribuição e comunicação dos poros afetam a cinética do mecanismo hidrodinâmico (ANDRÉS et al., 1999).

A aceleração do processo de desidratação pela aplicação de vácuo sugere, então, taxas diferenciadas de perda de água e de ganho de soluto daquelas que são características do processo a pressão atmosférica.

A compreensão da teoria proposta por Fito e Pastor (1994), bem como sua verificação experimental, levam a um melhor entendimento dos fenômenos de impregnação e de desidratação quando se trabalha sob vácuo.

Existem poucos trabalhos na literatura, enfocando esses aspectos com relação à pêra que é uma fruta porosa. Frutas com alta porosidade são mais suscetíveis ao tratamento a vácuo (SHI et al., 1995). É oportuno ressaltar que o consumo, a produção e o comércio internacional de pêras, especialmente de pêra argentina, têm crescido muito nos últimos anos.

Mata (1991); Mata e Fito (1992); Pastor et al. (1992 a, b); Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994) notaram que a aplicação de vácuo, tanto da forma contínua como na forma de pulso de vácuo, aumentou a taxa de perda de água em processos de desidratação osmótica, sem, contudo, parecer ter influenciado o ganho de açúcar. Em contrapartida, Giraldo et al. (2003) trabalhando com pulso de vácuo, obteve perdas menores de água, com este tratamento que a pressão atmosférica e também ganhos de açúcar consideravelmente maiores com este tratamento que a pressão atmosférica.

Considerando-se a diversidade das respostas aos tratamentos a vácuo relatados na literatura, objetivou-se, nessa pesquisa, determinar a perda de água e o ganho de açúcar de pêra argentina em função do tempo para as três condições de pressão, vácuo contínuo, pulso de vácuo e pressão atmosférica, o que não foi encontrado, para tal fruta, na literatura. Também procurou-se determinar o decaimento da atividade de água perante esses processos sobre o que também não foi encontrado nenhum registro na literatura para nenhuma fruta.

Hofmeister (2003) constatou a presença de azul de metileno nos tecidos internos de maçã e na superfície de amostras de abacaxi submetidos a tratamentos a vácuo em soluções do corante. Desta maneira, concluiu que os poros da primeira fruta eram interligados enquanto que da outra não. Considerando diferença nas respostas a impregnação com

abacaxi e com maçã, as diferenças microestruturais entre as frutas e também a necessidade de se visualizar as diferenças entre os processos a vácuo e a pressão atmosférica, procurou-se, nesta pesquisa estudar o comportamento das peras argentinas perante a impregnação a vácuo e a pressão atmosférica, com solução de azul de metileno.

Fito (1994) estudando o HDM no caso de frutas encontrou, para pêra, um valor de porosidade efetiva aproximadamente igual a 14 %. Todavia, Salvatori (1997) chegou a um valor igual a 3,4 % usando o HDM acoplado aos fenômenos de deformação e relaxação. Salvatori et al. (1998) e Chiralt et al. (1999), entretanto, ressaltaram que, em termos práticos, as deformações são consideradas negligenciáveis para um grande número de frutas.

Considerando essa discrepância e a necessidade do conhecimento da porosidade efetiva dos alimentos, como ressaltado por Mújica-Paz et al. (2003), a presente pesquisa objetivou a determinação da porosidade efetiva de peras argentinas e também da porosidade obtida através das densidades real e aparente de forma que uma comparação entre ambas pôde ser feita. A comparação entre as porosidades efetivas que são obtidas através dos modelos e a que é obtida a partir das densidades foi inicialmente relatada por Mújica-Paz et al. (2003) e por Cháfer et al. (2003), usando outras frutas.

Não foram encontrados na literatura trabalhos estudando o comportamento de frutas simultaneamente em solução de sacarose isotônica e em seus sucos, de maneira a saber se o HDM explicaria satisfatoriamente os fenômenos e as possíveis diferenças em ambos os casos. Dessa maneira, estudou-se o comportamento de impregnação das peras argentinas imersas no próprio suco e em solução isotônica de sacarose.

Assim, primeiramente, determinou-se o comportamento de peras argentinas durante desidratações osmóticas a vácuo, a pulso de vácuo e a pressão atmosférica, estabelecendo-se, para isso, os perfis de umidade, de sólidos solúveis e de atividade de água. Também se verificou, experimentalmente, o modelo hidrodinâmico nessa variedade de pêra e determinou-se a sua porosidade característica.

***CAPÍTULO II –
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a desidratação osmótica de frutas, o mecanismo hidrodinâmico, e a fruta usada neste estudo, distribuídos, respectivamente, em três tópicos.

A desidratação osmótica é apresentada inicialmente, ressaltando-se aspectos tecnológicos e, sobretudo, de transferência de massa, com destaque para aqueles que ocorrem sob vácuo.

No segundo tópico, é apresentado o modelo físico proposto por Fito e Pastor (1994), explicando um dos fenômenos que ocorre sob vácuo - o mecanismo hidrodinâmico (HDM).

No último tópico, são abordadas diversas características e dados sobre a pêra, referentes à sua morfofisiológica e a dados de mercado. Também é apresentada uma contextualização da fruta, no âmbito científico do trabalho proposto. Ficam, assim, ratificadas a imaneente relevância do presente estudo, bem como a adequação da referida fruta.

2.1 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

Durante as últimas décadas, muitos trabalhos têm sido realizados para melhorar a qualidade final de produtos à base de frutas (SHI & FITO, 1994). Desde que Ponting et al (1966) sugeriram, pela primeira vez, um processo para a redução do peso, em até 50 %, pela desidratação osmótica de maçãs e o aplicaram, com sucesso, antes do processo de secagem a vácuo para reduzir o conteúdo de água e melhorar a qualidade, a desidratação osmótica, como uma tecnologia potencial alternativa a outras operações de desidratação convencionais, está sendo utilizada amplamente na indústria de processamento de frutas, de vegetais, de carnes e de peixe (SHI & FITO, 1993). Tal tecnologia visa à redução da atividade de água (a_w) e que, conseqüentemente, reduz o crescimento microbiano (ROSA & GIROUX, 2001), além de atribuir características organolépticas diversas aos alimentos processados. Reduz ainda a ação enzimática (GIRALDO et al., 2003). A salga e a adoçagem, por exemplo, estão em uso desde os tempos remotos; a primeira, para

impregnar os alimentos com sal, enquanto que a segunda, com açúcar (MAROUZÉ et al., 2001).

O processo osmótico consiste na imersão de alimentos em soluções hipertônicas, dando origem a pelo menos dois fluxos simultâneos em contra-corrente: um importante fluxo de água para fora do alimento, em direção à solução e uma transferência simultânea de soluto, da solução para o interior da fruta (SALVATORI et al., 1999). A Figura 2.1 representa uma ilustração do processo.

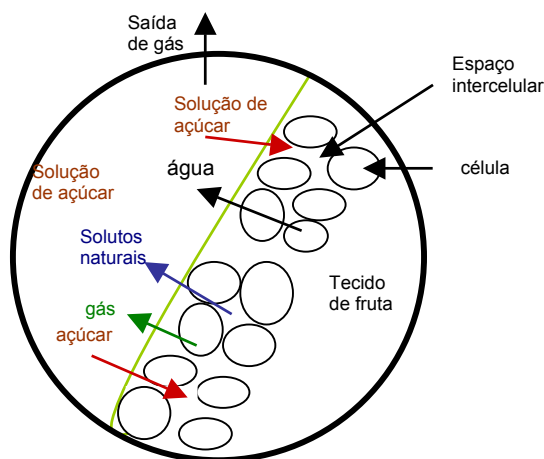


Figura 2. 1 - Fenômenos de transferência de massa em sistema multicompente de migração de desidratação osmótica a vácuo de frutas (SHI & FITO, 1993).

Como a solução hipertônica tem uma pressão osmótica maior e uma atividade de água mais baixa, uma força motriz para a remoção da água surge entre a solução e as frutas (SHI & FITO, 1994).

Além dos fenômenos difusivos que ocorrem durante a desidratação osmótica, algumas mudanças, na porosidade e no volume dos alimentos, ocorridas, durante este processo, promovem a ação de forças motrizes não difusivas tais como: gradientes de pressão associados à relaxação da matriz celular deformada, juntamente com a liberação da tensão estrutural armazenada no sistema. Mudanças nas propriedades estruturais e de transporte (volume, dimensões, viscosidade, densidade, porosidade...) afetam os fluxos de massa (BARAT et al., 1998). Dainty (1963) observou que células completamente túrgidas, quando postas em soluções hipertônicas, apresentam o período inicial de redução de volume, seguido por um período de aumento de volume.

Mais recentemente, estudos de transferência de massa, durante processos que se classificam na categoria de desidratação osmótica ou de tratamento osmótico –TO– (POINTING et al., 1966), mostraram que a impregnação de soluto foi sempre acompanhada por desidratação. Além do mais, esses estudos indicaram que se os

parâmetros de monitoramento do processo (temperatura, concentração da solução, agitação do alimento na solução e a pressão de trabalho) forem controlados, tais processos poderão ser orientados em direção a uma vasta gama de aplicações, desde alta desidratação, acompanhada da baixa impregnação, até alta impregnação, acompanhada de baixa desidratação (LE-MAGUER, 1988; RAOULT-WACK, 1994). Muitos estudos anteriores focaram a atenção na retirada rápida e efetiva de quantidades desejadas de água de frutas. A quantidade e a taxa de transferência de água do tecido da fruta, durante o processo de desidratação osmótica, depende de muitas variáveis, tais como: a concentração de soluto, a composição química da solução osmótica, a temperatura da solução, a natureza das frutas, suas geometrias, o tempo de contato, a agitação da solução e outros. A influência destes parâmetros, na extração de água e no ganho de açúcar, tem sido amplamente estudadas. Alguns métodos têm sido empregados para acelerar a transferência de água, tais como: o uso de soluções osmóticas altamente concentradas, altas temperaturas de solução, prolongamento dos tempos de tratamento e outros. Todavia, a intensificação da perda de água pelo aumento da temperatura e do gradiente de concentração é limitada. Altas temperaturas e longos tempos de tratamento podem comprometer a qualidade dos produtos de frutas devido à mudanças desfavoráveis no sabor, na cor e na textura (SHI & FITO, 1994).

A desidratação osmótica a vácuo tem sido apresentada como uma alternativa para tornar as condições de processamento mais suaves e, ainda assim, conseguir altas taxas de transferência. Ela tem, por isso, sido apresentada como uma alternativa para aumentar a taxa de transferência de água sem comprometimento aos atributos sensoriais desejados. Alguns estudos a vácuo provam que, sob essa condição, cinéticas de desidratações mais rápidas são obtidas (ZOZULEVICH & D'YACHENKO, 1969; HAWKES & FLINK, 1978; DALLA ROSA et al., 1982; MATA, 1991; PASTOR et al., 1992a,b). O tratamento de desidratação osmótica a vácuo foi benéfico e levou a um importante aumento da perda de água em comparação ao tratamento a pressão normal. Ele contribuiu para obtenção de frutas desidratadas de melhor qualidade, ao manter a duração da desidratação osmótica tão breve quanto possível (SHI & FITO, 1993). O tratamento a vácuo levou a um importante aumento na perda de água em abricós de 24,2g/100g, em comparação ao tratamento a pressão normal (SHI & FITO, 1994). De acordo com os resultados experimentais obtidos por (SHI & FITO, 1993), mostrados na Figura 2.2, a quantidade de água perdida no tratamento a vácuo a 40°C foi, aproximadamente, igual à quantidade de água perdida no tratamento a pressão normal a 50°C.

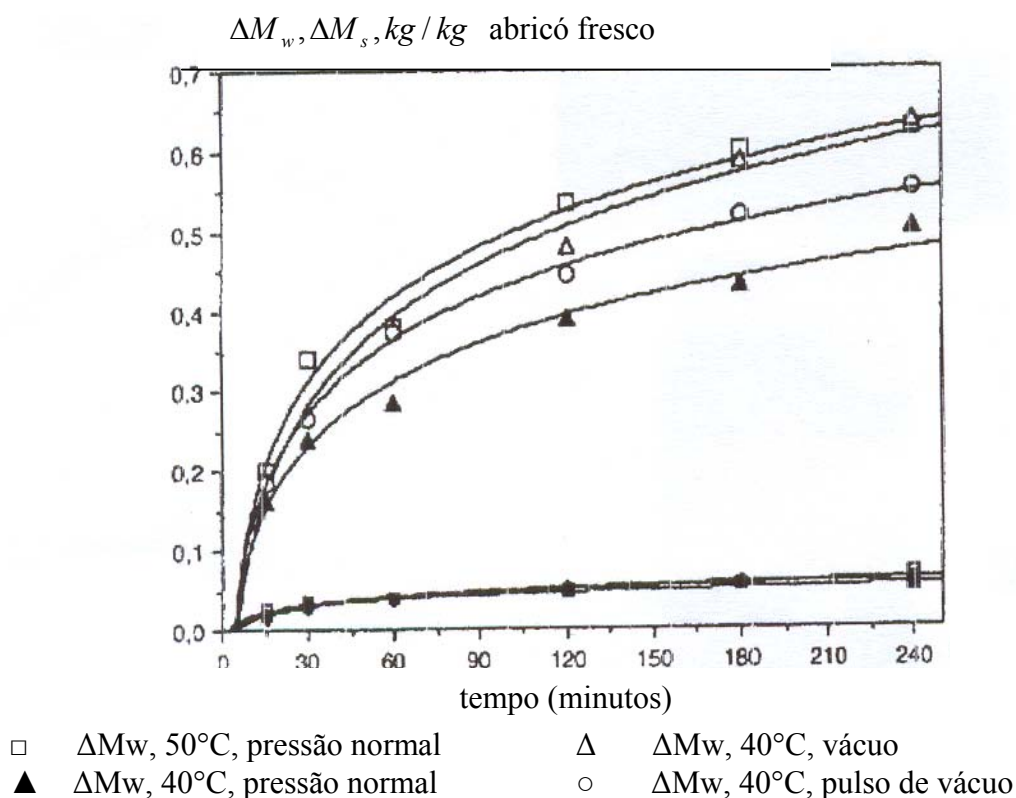


Figura 2.2 – O comportamento da perda de água das amostras de abricó, em diferentes tratamentos (solução de açúcar: 65°Brix; vácuo: 100 mb) (SHI & FITO, 1993).

A tecnologia de desidratação osmótica a vácuo torna possível trabalhar com temperaturas de solução menores e obter, mesmo assim, altas taxas de perda de água. Produtos finais de melhor qualidade são, então, esperados, a partir de um processo com temperaturas inferiores a 50°C e a vácuo, uma vez que essas condições podem evitar danos característicos da aplicação de calor, preservando aromas, cores e sabores naturais e alguns componentes nutritivos termo-sensíveis, garantindo, ainda, altas taxas de perda de água (SHI & FITO, 1993). As Figuras 2.3 e 2.4 mostram, como um exemplo, os resultados obtidos em desidratação osmótica de fatias de maçã (variedade Granny Smith), correspondentes a trabalho experimental feito no departamento de tecnologia de alimentos da universidade politécnica de Valencia (MATA, 1991; MATA & FITO, 1992; PASTOR et al., 1992 a, b).

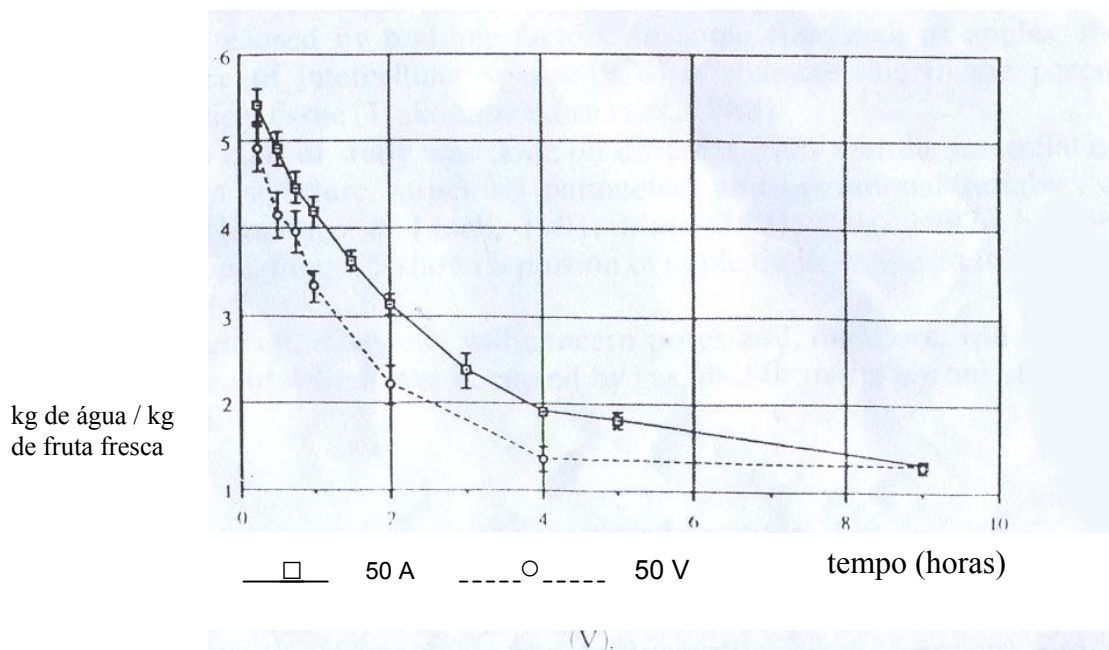


Figura 2.3 – Perda de água em fatias de maçã em desidratação osmótica a 50°C; pressão atmosférica (A), vácuo (V).

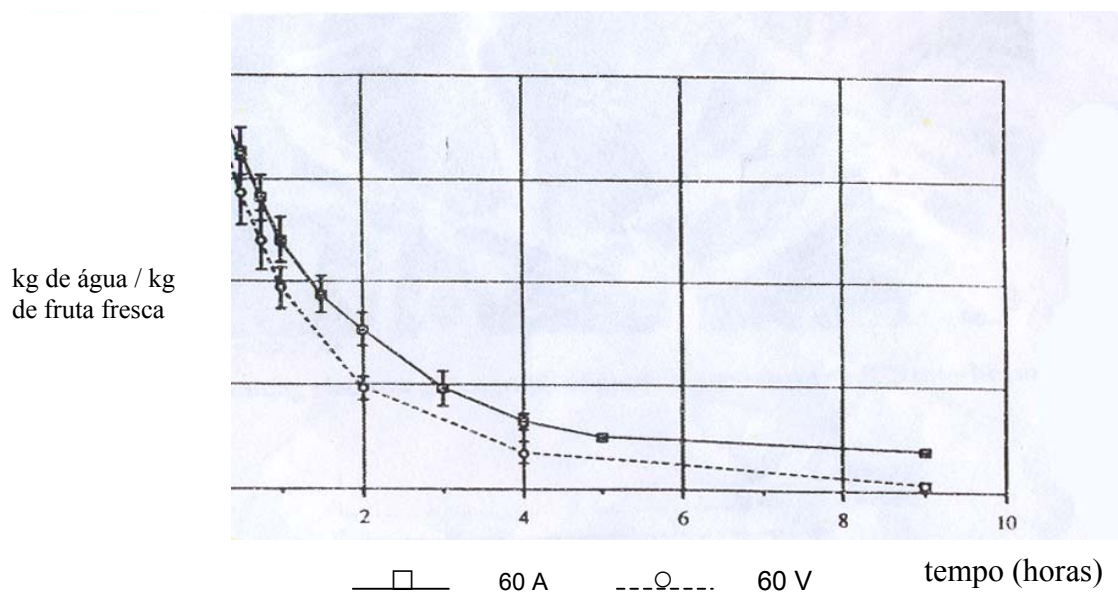


Figura 2.4 – Perda de água em fatias de maçã em desidratação osmótica a 60°C; pressão atmosférica (A), vácuo (V).

Os resultados de perda de água correspondem aos experimentos feitos com fatias de maçã com 8 mm de espessura, usando uma solução de sacarose a 65 % e trabalhando a 50 e 60°C e com pressões de 103, 17,6 e 12,0 kPa (as duas últimas são as pressões de vapor em cada temperatura testada). A aplicação de vácuo aumentou, significativamente, a taxa de perda de água, comparada àquela obtida a pressão atmosférica, à mesma temperatura:

quanto menor era a pressão de trabalho, mais significativa era a diferença (MATA, 1991; MATA & FITO, 1992; PASTOR et al., 1992 a, b).

O aumento na taxa de perda de água é difícil de ser explicado somente por mecanismos clássicos difusivo e osmótico e pela abordagem de um mecanismo capilar que também não explica corretamente a dependência entre taxa de transferência e pressão de trabalho (FITO, 1994). Por isso, um mecanismo fluxo hidrodinâmico, que ocorre quando se trabalha a vácuo, foi descrito em um trabalho anterior (FITO & PASTOR, 1994).

Uma abordagem para entender mudanças nos alimentos, ao longo dos processos osmóticos, é considerar o alimento como um sistema termodinâmico idealizado formado por três fases: sólida ou matriz sólida (MS) da fruta; líquida (FL), incluindo água e compostos nela solúveis; e gasosa (FG), que ocupa os poros do alimento e que determina a porosidade do produto (FITO et al., 2001). Levando-se em consideração a estrutura porosa das frutas, devido à presença de espaços intercelulares (ICS), e à existência de uma certa quantidade de gás aí ocluso (TRAKOONTIVAKORN et al., 1998), que é comprimido quando o líquido exterior (solução osmótica em DO) penetra como resultado da ação capilar (no caso de DOA) ou pelo efeito combinado da ação capilar e de gradiente de pressão que são impostos ao sistema (no caso de DOV), pode-se entender melhor as cinéticas de transferência de massa mais rápidas obtidas nas operações a vácuo (FITO & PASTOR, 1994).

Essas operações são realizadas em duas etapas após a imersão do produto no equipamento contendo a fase líquida. Na primeira, vácuo (5,0, 10,0 kPa) é aplicado no sistema por um período curto, promovendo, assim, a expansão e o fluxo de saída do gás interno do produto. Na segunda, a pressão atmosférica é restabelecida levando ao fluxo de entrada do líquido externo na estrutura porosa o que causa compressão e grande redução do volume do gás remanescente nos poros (FITO et al., 2001).

Para entender melhor como e quando os fenômenos de impregnação são produzidos pelo HDM, assim como sua importância, é interessante analisar os estágios típicos que ocorrem em processos nos quais um sólido poroso é imerso em um líquido sob condições de vácuo. Esses estágios são esquematicamente mostrados na Figura 2.5, que é a representação de um poro ideal, nos diferentes estágios de uma operação a vácuo.

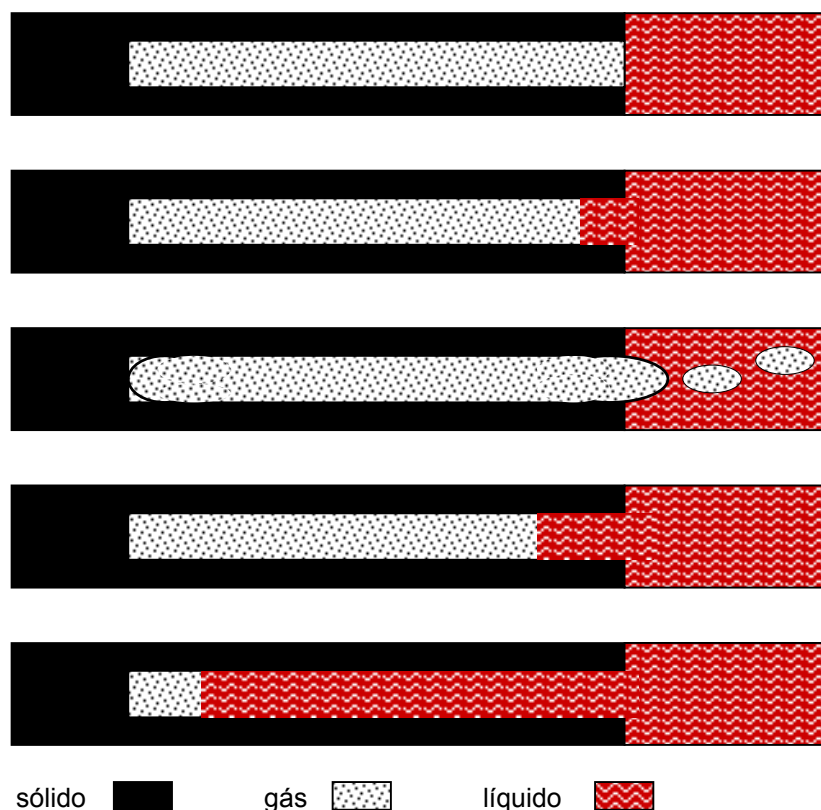


Figura 2.5 – Os estágios típicos em uma operação de transferência de massa num alimento poroso imerso em um líquido, a vácuo. Situação de um poro ideal (FITO, 1994).

Num primeiro momento, a fruta é imersa na solução, surgindo, assim, a pressão capilar. O gradiente de pressão que surge impele o líquido para o interior do poro, comprimindo o gás. Quando as pressões do gás e do líquido se tornam iguais, o líquido pára. Neste instante, tem-se uma pequena fração do poro impregnado pelo líquido. Num segundo instante, ocorre a aplicação de vácuo e a conseqüente saída da solução que havia penetrado e de gás ocluso nos poros que se encontra, agora, em expansão. Novamente, no momento em que a pressão do gás, no interior dos poros, for igual à da solução, a expansão e saída do gás cessam e, simultaneamente, surge a pressão capilar. Essa pressão capilar é igual a anterior, visto que nem o diâmetro do poro, nem a tensão superficial da solução mudaram. Todavia, a energia potencial do gás é menor uma vez que menos gás está no interior dos poros. Assim, como anteriormente, o líquido é impelido para o interior do poro, só que, agora, a profundidade atingida é maior já que o gás terá que se comprimir mais para variar a mesma pressão que anteriormente. Isso ajuda a explicar por que as cinéticas de transferência de massa são mais rápidas quando se trabalha a vácuo, em operações de desidratação osmótica. Em primeiro lugar, há um transporte total de modo

muito mais significativo quando se trabalha a vácuo. Segundo outros mecanismos (difusivo e osmótico) têm uma superfície interfacial maior disponível por causa da maior ocupação da superfície interna dos poros. Por último, quando a pressão atmosférica é restabelecida, cria-se o maior gradiente de pressão e, conseqüentemente, tem-se a maior penetração de solução no poro. Agora, os mecanismos difusivo e osmótico dispõem de uma superfície interfacial ainda maior (FITO, 1994).

Esses fenômenos de transferência foram descritos e modelados segundo uma teoria que ficou conhecida como: o mecanismo hidrodinâmico, ou, simplesmente, o HDM (FITO, 1994; FITO & PASTOR, 1994).

As análises de alguns resultados obtidos de experimentos de desidratação osmótica a vácuo (DOV) (MATA, 1992; FITO et al, 1993; PASTOR, 1994) mostraram que o mecanismo hidrodinâmico pode ocorrer concomitantemente a fenômenos de deformação-relaxação (FITO et al., 1995).

A fração do volume inicial das amostras, impregnada pelo líquido externo, quando o equilíbrio mecânico é atingido, foi modelada como uma função da taxa de compressão, da porosidade efetiva e das deformações no volume das amostras, ao final do processo e ao final da etapa de vácuo (FITO et al., 1996). Quando não há deformações, essa modelagem se simplifica ao modelo inicialmente proposto por FITO & PASTOR (1994), o HDM. Em termos práticos, deformações nas amostras são vistas como negligenciáveis para um grande número de frutas (SALVATORI et al., 1998; CHIRALT et al., 1999).

Existe um outro fenômeno, além daqueles até aqui abordados, que também é responsável pelo aumento da perda de água, durante a desidratação osmótica a vácuo. O tratamento a vácuo intensifica o fluxo capilar e, por isso, aumenta a taxa de transferência de água, significativamente (SHI & FITO, 1994). Segundo Shi e Fito (1993) e SHI e Fito (1994), a taxa total de transferência de água é resultado da combinação entre a difusão fickiana tradicional e o fluxo capilar a vácuo, na desidratação osmótica a vácuo. No processo de desidratação osmótica a pressão normal, a ação da pressão capilar, na remoção de água, é desprezível (SHI & FITO, 1994). Consoante SHI & FITO (1994), o fluxo capilar baseia-se no contato de três fases (sistema atmosfera-fruta-solução osmótica), o que é propiciado pela ação do vácuo, e que pode ser observado nas Figuras 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9.

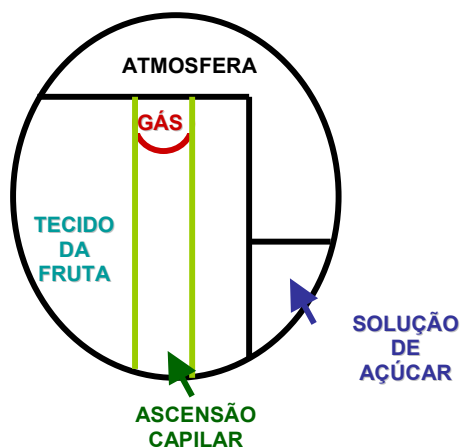


Figura 2.6 – Fruta em sistema de contato de três fases (atmosfera-fruta-solução) (SHI & FITO, 1994).

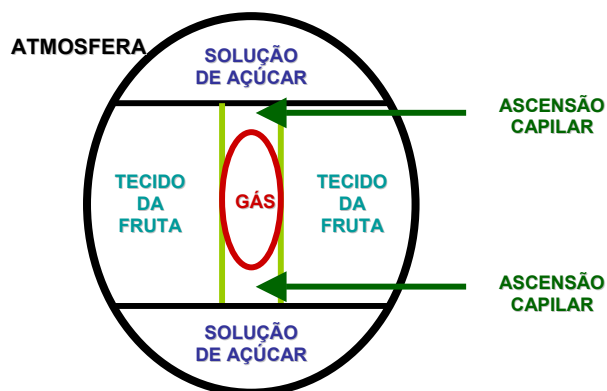


Figura 2.7 – Fruta em sistema de contato de duas fases (SHI & FITO, 1994).

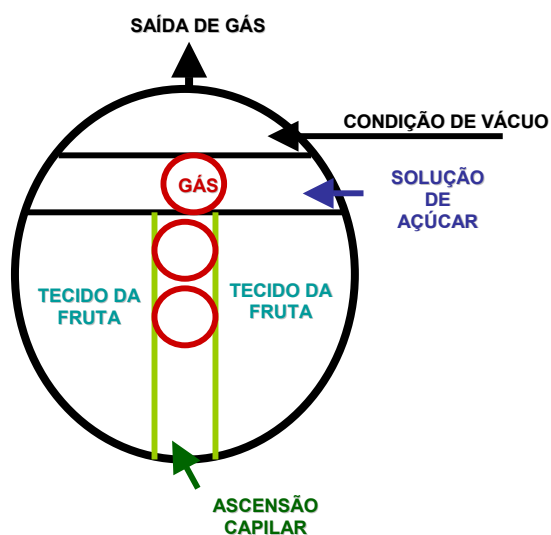
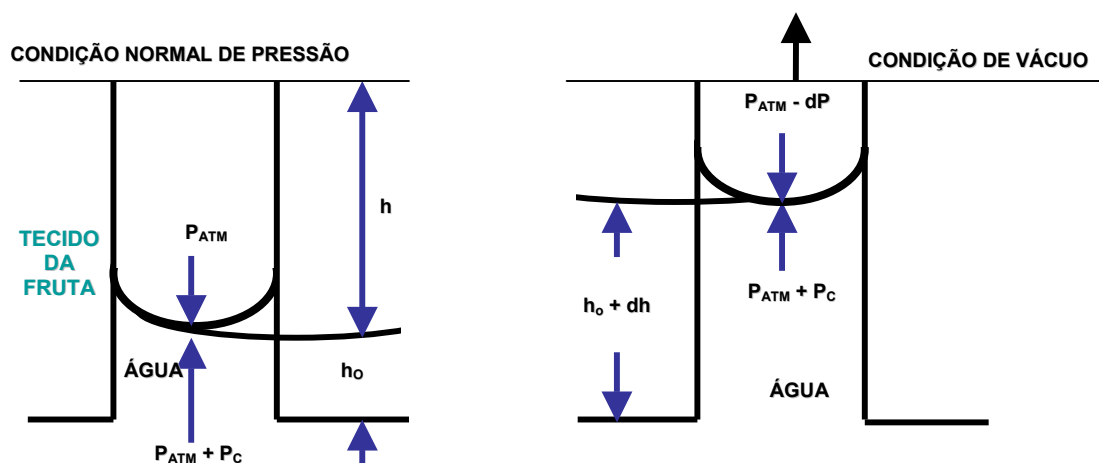


Figura 2.8 – Fruta em contato com solução e com atmosfera, durante processo de desidratação osmótica a vácuo (sistema de três fases de contato, fruta-solução-atmosfera) (SHI & FITO, 1994).



onde: h_0 – altura inicial ; h – altura; P_{atm} – pressão atmosférica; P_c – pressão capilar; dP – diferencial de pressão; dh – variação de altura.

Figura 2.9 – A ascensão capilar sob pressão normal e sob vácuo (SHI & FITO, 1994).

A Figura 2.6 ilustra essas três fases onde a ação capilar causa a ascensão do líquido presente no interior dos poros (capilares), o qual evapora para a atmosfera, em seguida. A Figura 2.7 representa a situação real de imersão de frutas em soluções osmóticas a pressão atmosférica. Neste caso, a solução entra nos poros e aprisiona o ar, não permitindo o contato entre as três fases. Por isso, a ação da pressão capilar na remoção de água se torna desprezível nessas condições; a água não evapora para a atmosfera. Quando ocorre a aplicação de vácuo, Figura 2.8, encerra-se esse aprisionamento, causando a saída de gás e o contato entre as três fases. Dessa maneira, a água pode, então, evaporar, e, assim, o fluxo capilar se torna importante. A Figura 2.9 mostra, ainda, a ascensão causada pela pressão capilar, sobre pressão normal, e a ascensão causada pela combinação desta com gradientes de pressão gerados pelo vácuo (SHI & FITO, 1994). A aplicação de vácuo viabiliza o fluxo capilar, ao propiciar o contato entre as três fases, e, ainda, causa uma ascensão extra do líquido no interior dos poros, além daquela propiciada pela pressão capilar, o que fez aumentar ainda mais a evaporação.

Há, naturalmente, uma grande variação, na natureza física das frutas, que afeta o comportamento osmótico e o estado do produto final desidratado osmoticamente (PONTING, 1973). Islam e Flink (1982), assim como Lenart e Flink (1984) destacaram que os eventuais efeitos de desidratação celular nas propriedades de transporte dependerão das características do tecido da fruta, especialmente do espaço intercelular presente no tecido. Quando frutas, como uma espécie de material alimentar poroso, são imersas em

solução de açúcar, o processo osmótico de saída de água é fortemente dependente das características biológicas microestruturais iniciais, dentre elas; a porosidade. A porosidade de uma fruta está relacionada à existência de gás no interior da estrutura porosa (SHI & FITO, 1994). A estrutura porosa dos alimentos desempenha um papel fundamental nos fenômenos de transferência de massa que acontecem nas operações a vácuo (FITO, 1994). A microestrutura do alimento, a porosidade, o tamanho, a distribuição e a comunicação dos poros afetam a cinética do mecanismo hidrodinâmico (ANDRÉS et al., 1995). Frutas com alta porosidade são mais suscetíveis ao tratamento a vácuo (SHI et al., 1995). Quanto maior a porosidade do produto, mais efetivamente a ação de mecanismos hidrodinâmicos promove as mudanças de composição desejadas, em operações realizadas em um curto tempo, sem quaisquer requisitos de temperatura (CHIRALT et al., 1999). O percentual de deformação da matriz sólida depende essencialmente da estrutura do material e de suas propriedades mecânicas, além, naturalmente, das condições de trabalho (ANDRÉS, FITO, CHIRALT, 1995).

A viscosidade afetou bastante a resposta ao processo de impregnação a vácuo (BARAT et al., 2001a; CHÁFER et al., 2001a). Isso está de acordo com as bases teóricas do mecanismo hidrodinâmico proposto por Fito e Pastor (1994). A relação inversamente proporcional entre a viscosidade e a razão entre o incremento de profundidade de penetração e o tempo pode ser observada na teoria proposta por Fito e Pastor (1994) (ANDRÉS, et al., 1995).

A cinética do mecanismo hidrodinâmico também depende da pressão de trabalho (FITO 1994). A pressão de operação, durante os tratamentos, é um importante fator na transferência de água e no ganho de açúcar, em frutas (SHI & FITO, 1994). A quantidade de líquido impregnado na estrutura do alimento, após o restabelecimento da pressão atmosférica, e, conseqüentemente a de soluto, depende principalmente da pressão de vácuo (MÚJICA-PAZ et al., 2003).

A entrada do líquido no ato do restabelecimento da pressão atmosférica é a impregnação a vácuo propriamente dita. Alguns autores (FITO, 1994; FITO & PASTOR, 1994) afirmam que a impregnação a vácuo (IV) de produtos porosos consiste na troca do gás ou do líquido internos, oclusos em poros abertos, por uma fase líquida externa, devido à ação de mecanismos hidrodinâmicos (HDM) promovidos por mudanças de pressão. Ainda, consoante Cháfer et al. (2003), a operação de impregnação a vácuo consiste na imersão do produto poroso na solução, seguida da aplicação de vácuo por um curto período, a fim de promover o fluxo de saída do gás interno, e, então, no restabelecimento

da pressão atmosférica por um período, no qual o fluxo hidrodinâmico de entrada de solução externa nos poros é promovido.

Nos últimos anos, a aplicação de impregnação a vácuo (IV) tem sido apontada como uma maneira útil de introduzir líquidos na estrutura porosa de alguns alimentos (FITO et al., 1996; CHIRALT et al., 1999). Dessa forma, a composição do produto, assim como suas propriedades físicas e químicas podem ser mudadas, a fim de melhorar algumas características dos alimentos (FITO & CHIRALT, 2000; FITO, CHIRALT et al., 2000). Ainda, segundo Fito et al. (2001), a operação de impregnação a vácuo nos permite incorporar quaisquer ingredientes em um produto poroso, a fim de adaptar sua composição a certos requisitos de estabilidade e de qualidade, de uma maneira rápida e simples. Se outros solutos são adicionados à solução, alimentos tratados dessa maneira podem ser devidamente formulados (MAROUZÉ et al., 2001). É um procedimento válido tirar vantagem da estrutura original dos alimentos frescos, para incorporar componentes fisiologicamente ativos e, assim, obter alimentos frescos e funcionais (FITO et al., 2001). A incorporação de ácidos, de conservantes, de nutrientes especiais, de antioxidantes, de vitaminas, de cátions, de açúcares ou de outros depressores de atividade de água se faz possível, através da impregnação a vácuo (FITO et al., 2001; FITO et al., 2001). Assim, a impregnação a vácuo pode ser considerada como um recurso para o desenvolvimento de produtos de frutas uma vez que modifica convenientemente suas composições originais (CHIRALT et al., 1999). A impregnação a vácuo também modifica algumas propriedades físicas do produto, o que constitui vantagens para outros processos posteriores (MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 1998a; MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 2000). O desenvolvimento de novos métodos de processamento que preservem ou aumentem a qualidade nutricional das frutas, aguçando suas propriedades organolépticas (por exemplo, aumentando a doçura) é necessário para o desenvolvimento de novos produtos de frutas. Nesse sentido, a impregnação a vácuo (IV) com soluções adequadas (FITO et al., 2001) pode ser uma técnica interessante para desenvolver produtos de frutas de alta qualidade como ingredientes alimentares, pela introdução de açúcares (CHÁFER et al., 2001), de conservantes, de nutracêuticos e de outros, em suas estruturas altamente porosas (SPIEGEL-ROY & GOLDSHIMDT, 1996). Tem sido demonstrado que a impregnação a vácuo de frutas porosas é altamente efetiva em promover processos de transferência de massa em tecidos (SALVATORI et al., 1998). No que diz respeito à tecnologia de métodos combinados, a impregnação a vácuo com crioprotetores (açúcares do mosto concentrado de uvas) e com crioestabilizantes (pectina MH), aplicada para reduzir os danos gerados por

crístais de gelo em cilindros congelados de maçãs, propicia uma redução notável da quantidade de água disponível para congelamento, o que pôde melhorar a resistência da fruta aos danos gerados pelo congelamento (MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 1998). As análises das microestruturas dos produtos, após o congelamento, por microscopia eletrônica de transmissão e luz, mostraram que os tecidos submetidos ao pré-tratamento de impregnação a vácuo com crioprotetores e crioestabilizantes mantiveram uma maior integridade dos tecidos celulares (TORREGGIANI, BERTOLO, 2001). A impregnação a vácuo permite uma impregnação mais rápida e controlada de solutos desejados, em alimentos. Ela tem sido aplicada a frutas minimamente processadas (TAPIA DE DAZA et al., 1996; TAPIA DE DAZA et al., 1999), a produtos de umidade intermediária (TAPIA DE DAZA et al., 1996) e em processos crioprotetores (FITO et al., 1996, MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 1998). Entretanto, para alcançar uma impregnação maior e eficiente, é necessário conhecer a porosidade efetiva do alimento, a fim de predizer o volume máximo de solução que pode ser impregnado. O conhecimento do comportamento de impregnação do alimento, sob diversas condições de impregnação a vácuo, é essencial para desenvolver alguns processos de conservação (MÚJICA-PAZ et al., 2003).

Fito e Pastor (1994) fizeram a primeira verificação experimental do modelo hidrodinâmico (HDM) onde observaram a dependência linear entre a fração do volume inicial da fruta impregnada e a fração do volume dos poros impregnada. O HDM prevê um comportamento linear entre essas variáveis (FITO & PASTOR, 1994; FITO, 1994). A Figura 2.10 mostra essa dependência; o coeficiente angular da reta (0,22) foi apontado como a porosidade efetiva das amostras de maçã *Granny Smith* testadas (FITO & PASTOR, 1994).

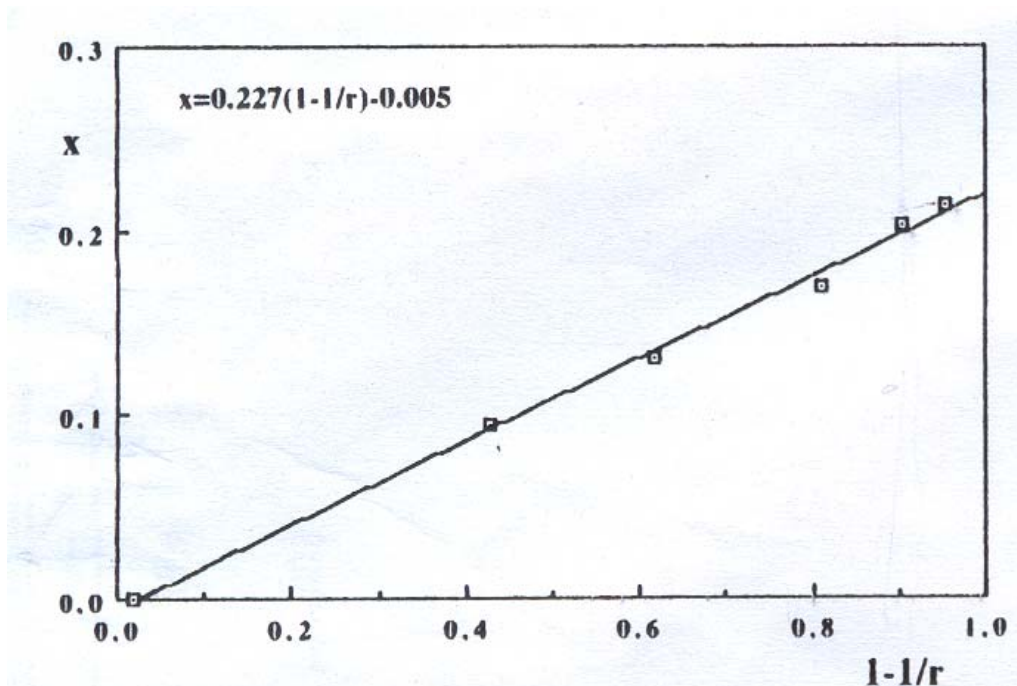


Figura 2.10 – Valores experimentais de x em função de x_v , onde: x é a fração do volume da fruta impregnada pela solução e x_v é a fração do volume dos poros da fruta impregnada pela solução (FITO & PASTOR, 1994).

As fatias de maçã, de 8 mm de espessura, previamente pesadas, eram imersas em solução isotônica de sacarose (a fim de evitar outros mecanismos de transferência de massa) e, então, reduzia-se a pressão. As pressões usadas foram 60, 40, 20, 10 e 5 kPa, aplicadas durante 5 minutos, após os quais a pressão atmosférica era restabelecida. As amostras eram, então, retiradas da solução e pesadas novamente: a diferença no peso foi atribuída à penetração hidrodinâmica. Ainda foi obtido um valor de pressão capilar de 1,9 kPa. Com esse valor, foi constatado que, para pressões inferiores a 60 kPa, o erro ao se calcular x_v desconsiderando a pressão capilar, é menor que 2,5%. Os autores afirmam que, por isso, se o trabalho for realizado em pressões suficientemente baixas, as forças motrizes, devido às pressões impostas ao sistema, controlam o HDM (FITO & PASTOR, 1994).

Posteriormente, Fito (1994), usando o mesmo método experimental descrito por Fito e Pastor (1994), estudou o comportamento de oito diferentes frutas com pressões que variaram de 103,0 kPa a 5,0 kPa. Entretanto, neste estudo, a pressão capilar foi desprezada por desconhecerem-se os valores dos diâmetros dos poros das frutas. Segundo o autor, a teoria prevê que essa simplificação não influi significativamente para faixas de pressões baixas, onde a pressão capilar perde importância nesses fenômenos de transferência de

massa. Em muitos casos, somente foi possível ajustar uma reta na faixa de pressões baixas como mostra a Figura 2.11 (FITO, 1994).

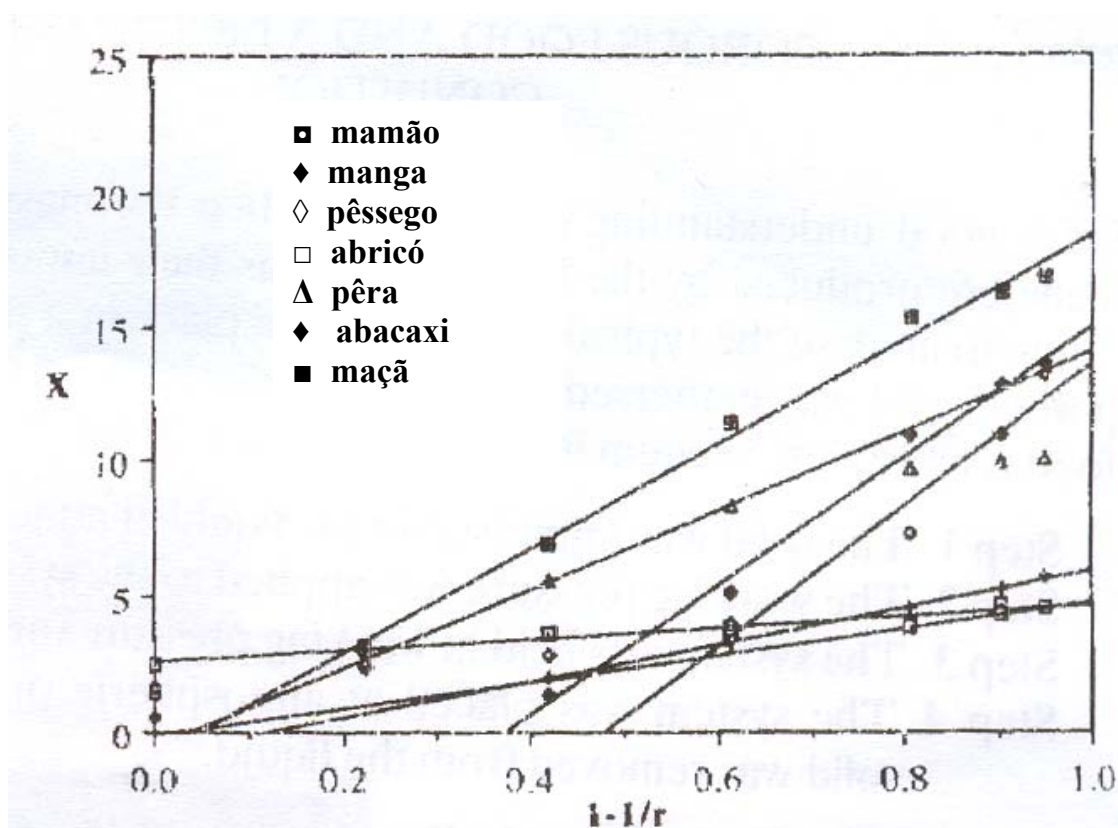


Figura 2.11 – Valores experimentais de x em função de x_v , para diferentes frutas testadas onde x é a fração do volume das frutas impregnada pela solução e x_v é a fração do volume dos poros das frutas impregnada pela solução (FITO & PASTOR, 1994).

As equações propostas permitem o cálculo dos volumes de líquido transferidos através do mecanismo hidrodinâmico e explicam a influência da pressão e das características microestruturais dos alimentos. Um valor aproximadamente igual a 14% foi obtido para a porosidade efetiva de pêra, como pode ser visto no gráfico 2.1.12, que mostra as porosidades de diferentes frutas, em função das pressões de trabalho (FITO, 1994).

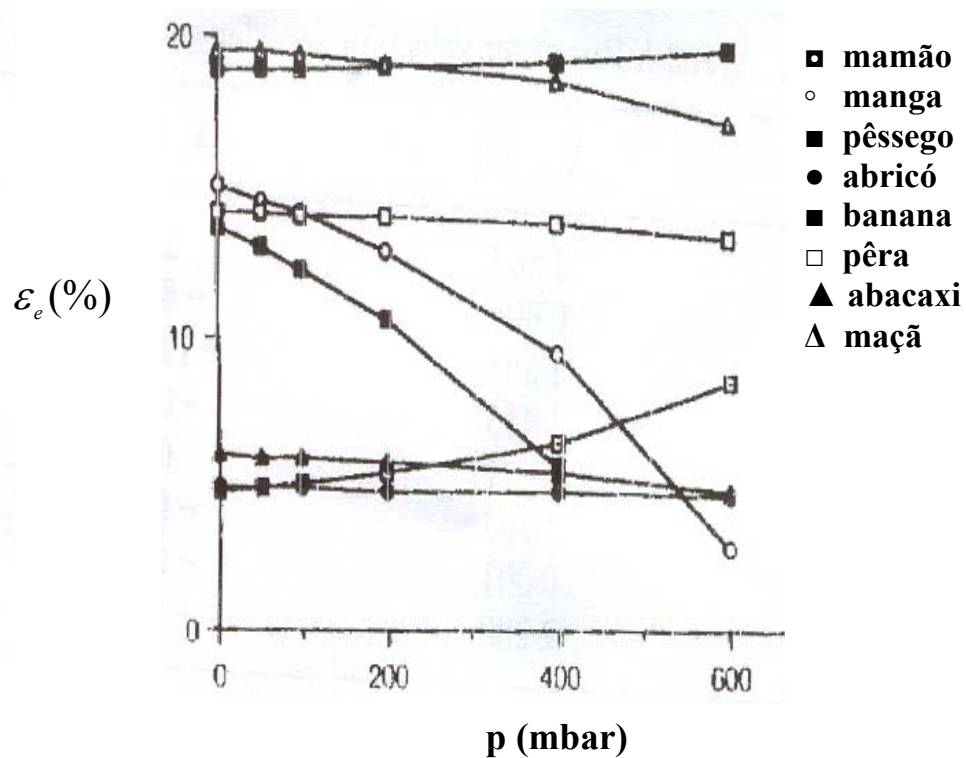


Figura 2.12 – Valores de porosidade efetiva em diferentes pressões para cada fruta (FITO, 1994).

Neste caso, os coeficientes angulares da Figura 2.11 não foram apontados como as porosidades efetivas cujos valores foram, então, obtidos de outra maneira (FITO, 1994). Na Tabela 2.1, encontram-se as repostas à impregnação a vácuo de algumas frutas bem como suas propriedades físico-químicas, consoante trabalhos diversos.

Tabela 2.1 - Algumas propriedades físico-químicas e respostas à impregnação a vácuo de algumas frutas.

Produto	Geometria	x_w	RI	ρ_a	ρ_r	x_1	γ_1	x	γ	ε_e
Maçã <i>Granny Smith</i> (Salvatori, 1997)	Cilindro (d=20 mm, h= 20 mm) ^b	0.86 ±	10.35±	802±	1052±	-4.2±	1.7±	19±	-0.6±	21±
		0.03	0.04	10	1	0.3	0.3	1.5	1.2	0.9
Maçã, <i>Red Chief</i> (Salvatori, 1997)	Cilindro (d=20 mm, h= 20 mm)	0.8587±	12.96±	830±	1059±	-5±	2.1±	17.9±	-2.4±	20.3±
		0.0019	0.13	13	1	0.4	0.4	0.7	1	0.4
Maçã <i>Golden</i> (Salvatori, 1997)	Cilindro (d=20 mm, h= 20 mm)	0.835±	15.3±	787±	1055±	-2.7±	2.8±	11.2±	-6±	17.4±
		0.016	0.4	14	1	0.3	0.2	0.8	0.5	0.8
Manga <i>Tommy Atkins</i> (Salvatori, 1997)	Fatias (r=10 mm)	0.7868±	17.8±	1022±	1130±	0.9±	5.4±	14.2±	8.9±	5.9±
		0.0007	0.5	5	20	0.2	0.5	0.5	0.4	0.4
Morangos, <i>Chandler</i> (Salvatori, 1997)	Partes (d=50 mm)	0.991±	7.2±	984±	1050±	-2.1±	2.9±	1.9±	-4±	6.4±
		0.007	0.6	9	9	0.2	0.4	0.7	0.6	0.3
Kiwi <i>Hayward</i> (Salvatori, 1997)	Cubos (l=50 mm) ^d	0.815±	14.28±	1051±	1076±	0.2±	6.8±	1.09±	0.8±	0.7±
		0.011	0.13	6	6	0.2	0.6	0.14	0.5	0.5
Pêssego <i>Miraflores</i> (Salvatori, 1997)	Cubos (l=25 mm)	0.820±	15±	1038±	1065±	-2.29±	2±	6.5±	2.1±	4.7±
		0.002		5	1	0.13	0.3	0.5	0.4	0.3
Abricó, <i>Bulida</i> (Salvatori, 1997)	Metades de frutas	0.854±	13.5±	1048±	1057±	-0.2±	1.5±	2.1±	0.11±	2.2±
		0.013	1.5	3	18	0.2	0.4	0.3	0.18	0.2
Abacaxi <i>Espanola Roia</i> (Salvatori, 1997)	Fatias transversais (l=10 mm)	0.8899±	8.97±	1030±	1051±	-6.5±	1.8±	5.7±	2.3±	3.7±
		0.016	0.04	2	11	0.6	0.4	0.8	0.4	1.3
Pêra, <i>Passa Crassana</i> (Salvatori, 1997)	Cubos (l=25 mm)	0.803±	1.6±	1030±	1070±	-1.3±	2.8±	5.3±	2.2±	3.4±
		0.016	2	8	30	0.2	0.2	0.9	0.7	0.5
Ameixa, <i>President</i> (Salvatori, 1997)	Parte de uma metade	0.810±	17.6±	1070±	1090±	-1±	0.6±	1±	-0.8±	2±0.2
		0.007	1	10	2	0.1	0.1	0.1	0.1	
Melão, <i>Inodora</i> (Salvatori, 1997)	Cilíndricas (d=20mm, h=20 mm)	0.910±	10.2±	976±	1022±	-4±	2±	5±	0.4±	6±0.3
		0.002	0.3	14	13	0.3	0.3	0.2	0.2	
Laranja <i>Valencia Late</i> (Cháfer et al., 2001, Cháfer González- Martínez, Ortolá, Chiralt, & Fito, 2000)	Retângulos (2 x 7 cm) (t= 5 mm)	0.76±	14.2±	770±	1085±	-6±	2±	40±	14±	21±
		0.02	0.012	2	2	0.02	0.02	0.05	0.03	0.04
Tangerina, <i>Satsuma</i> (Cháfer et al., 2001)	Retângulos (2 x 7 cm) (t= 4.5 mm)	0.75±	15.2±	849±	1103±	-6±	-3±	44±	12±	25±
		0.02	0.017	3	1	0.02	0.02	0.05	0.13	0.11

^a x_w , conteúdo de água (kg de água/kg de produto); RI, índice de refração (°Brix); ρ_a , densidade aparente (kg/m³ de amostra); ρ_r , densidade (kg / m³ de amostra, fases sólida e líquida); x_1 , x , fração volume inicial da amostra impregnada no final da etapa de vácuo e no final da etapa a pressão atmosférica, respectivamente; γ_1 , γ , deformações relativas de volume da amostra inicial nos mesmos estágios; ε_e porosidade efetiva; ^bd, diâmetro; h, altura; ^ct, espessura; ^dl, comprimento.

Salvatori (1997) trabalhou com pêra da variedade *Passa Crassana*, em cubos de 2,5 cm de aresta cujo index de refração era, aproximadamente, 16°Brix e cujas densidades aparente e real eram, respectivamente, 1030kg/m³ e 1070 kg/m³. A porosidade efetiva obtida, segundo método descrito por Fito et al. (1996), foi de 3,4 %. Segundo Mújica-Paz et al., (2003), a porosidade das amostras e as respostas à impregnação a vácuo variaram muito entre frutas, assim como entre variedades de uma mesma fruta.

Diversos tipos de corte foram usados para as diferentes frutas usadas em experimentos de impregnação a vácuo, como mostra a Tabela 2.1. Cortes cilíndricos foram aplicados em três diferentes variedades de maçãs e em melão; manga e abacaxi foram cortados em fatias; morangos, em pedaços; kiwi, pêssego e pêra, em cubos; abricó ao meio (SALVOTORI, 1997). Laranja e tangerina, em retângulos (CHÁFER et al, 2001; CHÁFER et al., 2000). Fito et al. (1996) cortaram bananas e maçãs em cilindros; abricó, ao meio; morangos e champignons foram usados inteiros.

Em experimentos de desidratação osmótica, Mata (1991), Mata e Fito (1992), Pastor et al., (1992 a,b) trabalharam com fatias de maçã de 8 mm de espessura, com solução de sacarose a 65°Brix e com temperaturas de 50 e 60°C. Shi e Fito (1993) trabalharam com abricós e abacaxis descascados, descaroçados e cortados em cubos. Depois de serem pesadas, as amostras eram imersas na solução osmótica, que era preparada pela diluição de sacarose comercial em água destilada. A concentração da solução em todos os experimentos foi de 65°Brix. Os ensaios ocorreram às temperaturas de 30, 35, 40 e 50°C. Os tempos de imersão foram de 15, 30, 60, 120, 180 e 240 minutos. As frutas foram escolhidas pelo mesmo grau de maturação, a fim de assegurar máxima uniformidade entre as amostras. Um grande excesso de solução de sacarose foi usado, a fim de evitar qualquer efeito significativo de diluição. A taxa total de transferência de água resultou da combinação da difusão fickiana tradicional com o fluxo capilar na desidratação osmótica a vácuo. A maioria do ganho de açúcar ocorreu na primeira hora e, então, tendeu a um equilíbrio. O ganho de açúcar, em diversos tipos de frutas tratadas sob as mesmas condições de desidratação osmótica, foi bastante diferente, como mostrado na Figura 2.13.

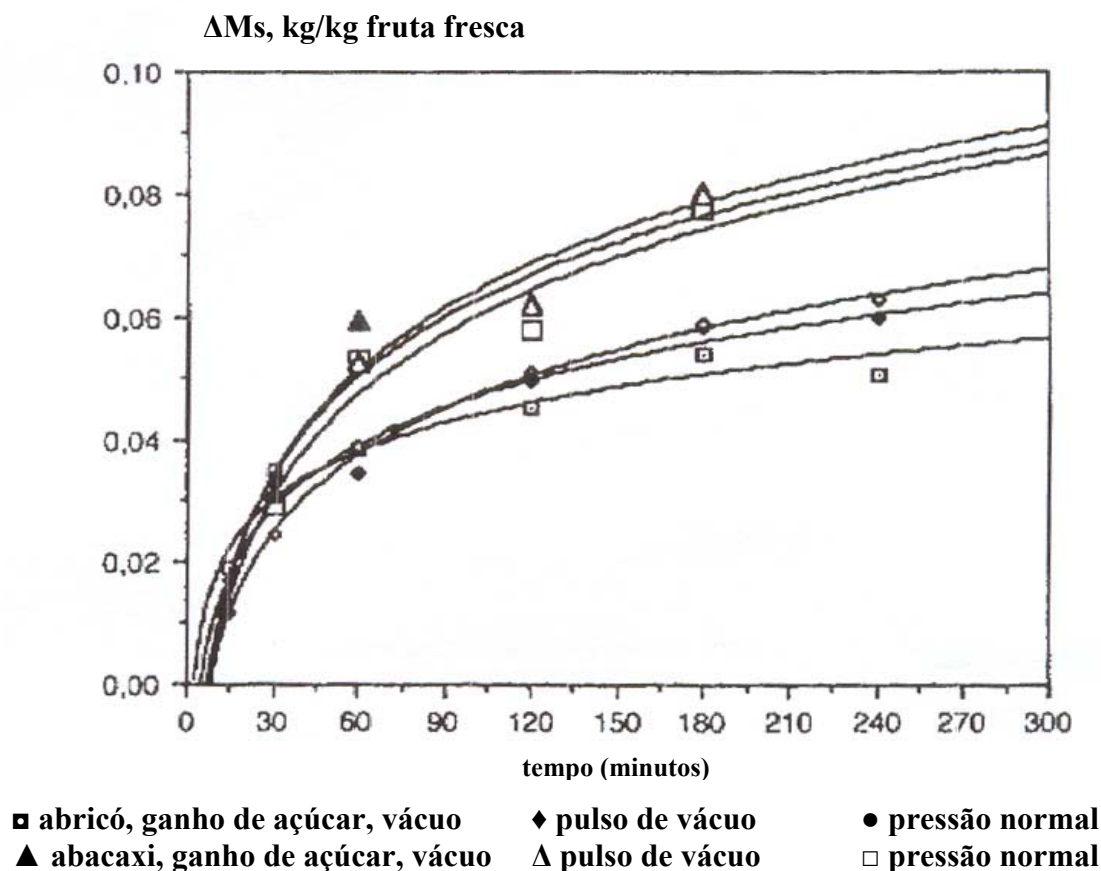


Figura 2.13 – Os diferentes comportamentos de ganho de açúcar nos diferentes tipos de frutas sob as mesmas condições de desidratação osmótica (solução de açúcar: 65°Brix, 40°C; vácuo: 10,0 kPa) (SHI & FITO, 1993).

As diferenças nos ganhos de açúcar de frutas desidratadas osmoticamente foram atribuídas às características biológicas dos tecidos das frutas. Conforme Ponting (1973), há, naturalmente, uma grande variação na natureza física das frutas que afeta o comportamento osmótico e o estado do produto final desidratado osmoticamente. Posteriormente, Shi e Fito (1994) trabalharam novamente com abricós descascados e descaroçados, desta vez, porém, cortados em pedaços (aproximadamente 20x40x10mm). Da mesma forma que antes, as amostras eram pesadas e, então, imersas na solução osmótica, que era preparada da mesma forma com a mesma concentração de 65°Brix, também, para todos os experimentos. As temperaturas utilizadas, desta vez, foram de 35, 40 e 50°C e os tempos de imersão foram os mesmos. As frutas também foram escolhidas pelo mesmo grau de maturidade, a fim de assegurar uniformidade máxima entre as

amostras. Após serem retiradas da solução osmótica, as amostras eram secas com papel absorvente, para eliminar o excesso de solução osmótica aderido à superfície externa e, então, pesadas novamente. A taxa total de transferência de água resultou da combinação da difusão fickiana tradicional com o fluxo capilar da desidratação osmótica a vácuo. No tratamento a vácuo, o aumento na quantidade de água transferida foi, principalmente, atribuído à ação combinada do tratamento a vácuo e do fluxo capilar. A Figura 2.14 apresenta os resultados obtidos nos experimentos.

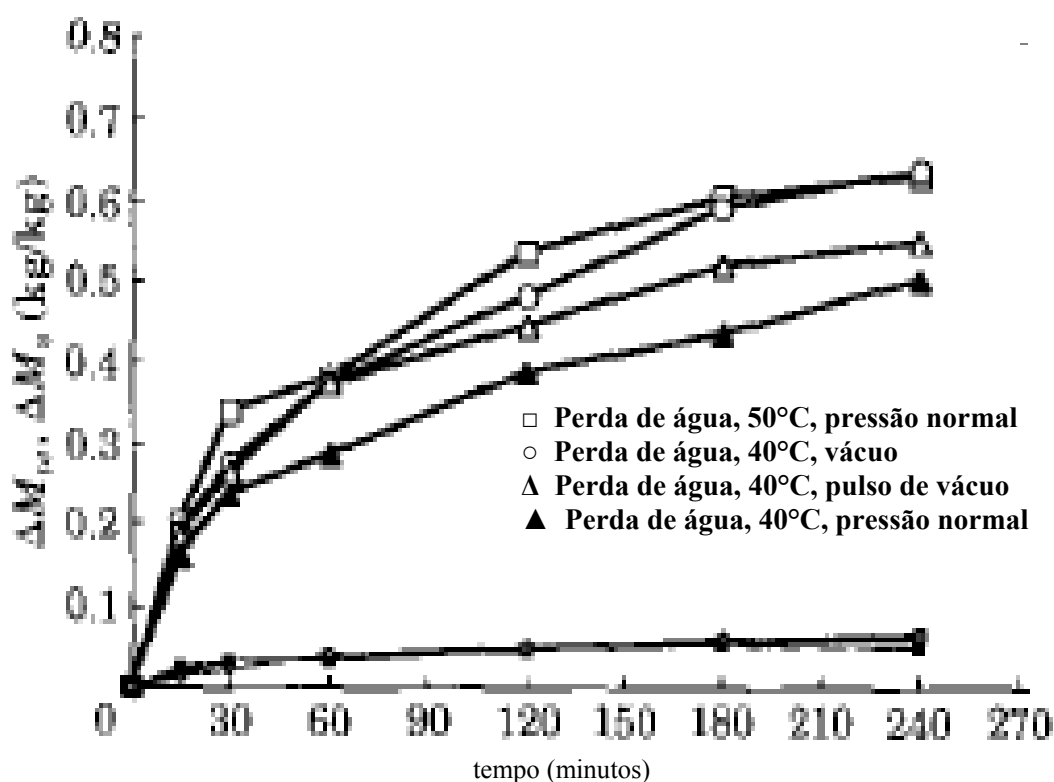


Figura 2.14 – Comportamento de transferência de massa de abricós em desidratação osmótica (solução de açúcar: 65°Brix; vácuo: 10000 Pa) (SHI & FITO, 1994).

A maioria do ganho de açúcar ocorreu na primeira hora e, então, tendeu a um equilíbrio. Barat et al. (2001) usaram maçãs descascadas, descaroçadas e fatiadas perpendicularmente à direção base-ápice. As dimensões dessas fatias eram: 10mm de espessura e 64 mm e 20 mm de diâmetros externos e internos, respectivamente. Três fatias foram obtidas de cada maçã. As amostras eram imersas por 15, 30, 45, 60, 120 e 420 minutos nas soluções osmóticas a 30, 40 e 50°C cujas concentrações eram 0,25; 0,35; 0,45; 0,55 ou 0,65 (p/p de sacarose em água destilada). Esses autores, assim como Shi e Fito (1993), usaram um excesso de solução, a fim de evitar qualquer efeito significativo de

diluição: a razão solução-fruta foi 50:1. Um fluxo constante de solução foi assegurado. Nenhum efeito importante da concentração da solução osmótica foi notado, exceto para experimentos realizados com soluções a 0,25 p/p a 30 e 40°C. Foi observada uma forte dependência da temperatura nos valores médios de difusividade efetiva.

Giraldo et al. (2003) verificaram perdas menores de água sob pulso de vácuo que a pressão atmosférica ao contrário do observado por Shi e Fito (1993) e por Shi e Fito (1994). Também constataram taxas de ganho de açúcar maiores ao longo dos processos a vácuo, evidenciando ganhos significativos muito rápidos, logo no início das operações, como mostra a Figura 2.15.

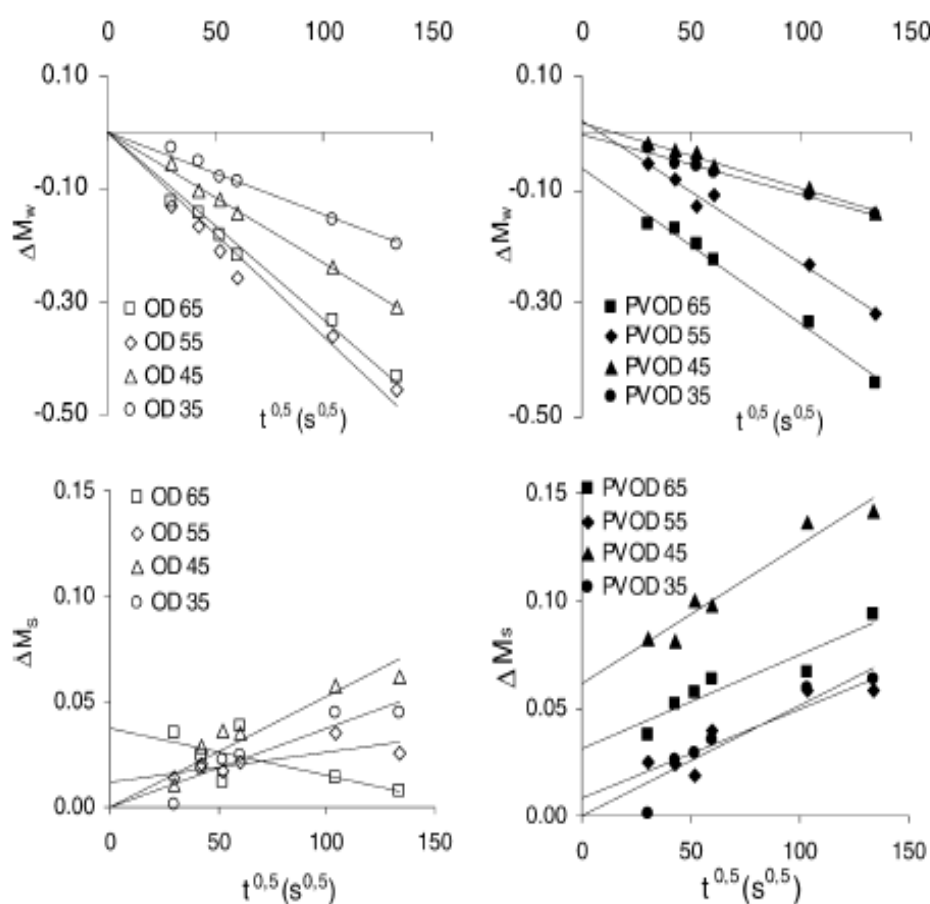


Figura 2.15 – Ganho de açúcar e perda de água como funções da raiz quadrada do tempo para desidratação osmótica a pressão atmosférica (DO) e a pulso de vácuo (PVDO) realizados com soluções de sacarose a diferentes concentrações. (GIRALDO et al., 2003).

Segundo os autores, isto aconteceu em função dos fluxos rápidos promovidos pelo HDM logo no começo dos processos. Os autores trabalharam a 30°C, com pulso de vácuo (5,0 kPa por 10 minutos), com soluções de sacarose a 65, 55, 45 e 35°Brix, durante diferentes intervalos de tempo: 15, 30, 45, 60, 180 e 300 minutos. A tabela 2.2 mostra os

coeficientes angulares e lineares relativos a Figura 2.1.15 bem como os valores de perda de água e de ganho de açúcar, para as diferentes condições, após 5 horas de tratamento.

Tabela 2.2 – Parâmetros cinéticos para a perda de água ΔM_w e para ganho de açúcar ΔM_s obtidos da regressão linear dos dados como uma função da raiz quadrada do tempo (k: coeficiente angular; k⁰: coeficiente linear; e R² das retas ajustadas).

	γ_s	$K_w^o \times 10^3$	$K_w \times 10^2$ (s ^{-0,5})	R ²	$\Delta M_w \times 10^2$ (5h)	$K_s^o \times 10^2$	$K_s \times 10^2$ (s ^{-0,5})	R ²	$\Delta M_s \times 10^2$ (5h)
O D	0,6	0	-0,33	0,98	-43,2	3,80	-0,023	0,49	0,74
	0,5	0	-0,36	0,95	-45,7	1,20	0,014	0,59	2,58
	0,4	0	-0,23	0,99	-30,9	0	0,052	0,85	6,13
	0,3	0	-0,14	0,97	-19,6	0	0,037	0,83	4,47
P V O D	0,6	-6,18	-0,27	0,98	-44,0	3,10	0,044	0,87	9,37
	0,5	2,23	-0,25	0,98	-32,0	0,88	0,041	0,82	5,86
	0,4	1,76	-0,11	0,98	-13,9	6,16	0,062	0,94	14,19
	0,3	-0,37	-0,10	0,98	-14,3	0	0,051	0,87	6,32

Fito e Pastor (1994) realizaram a verificação experimental do HDM onde as pressões de 60, 40, 20, 10 e 5 kPa eram, cada qual, aplicadas a um tratamento que, então, era integralmente realizado a essa pressão. Fito (1994), com o mesmo propósito, repetiu esse procedimento experimental, entretanto, usando pressões que variaram de 103 a 5,0 kPa. Considerando que o efeito mais importante do HDM é muito rápido e ocorre apenas quando o sistema é recolocado a pressão atmosférica, um novo procedimento foi desenvolvido, para realizar desidratações osmóticas a vácuo, sendo denominado desidratação osmótica a pulsos de vácuo. Através desse procedimento, curtos períodos (5 minutos, por exemplo) de tratamento a vácuo foram aplicados aos produtos, enquanto imersos na solução osmótica. Após esse período, os produtos seguiram a desidratação osmótica normal a pressão atmosférica. Dessa maneira, o preenchimento dos poros do alimento com a mesma solução osmótica foi induzido no começo do tratamento. Esse procedimento trouxe a maioria das vantagens da desidratação osmótica a vácuo convencional, onde vácuo é aplicado durante todo o período de desidratação, mesmo tendo sido realizado, a maior parte do tempo, sob pressão atmosférica (FITO et al., 1992). Esse procedimento tem sido estudado e oferece perspectivas muito boas (FITO, 1994). A Figura 2.16 mostra resultados obtidos por Shi e Fito (1993).

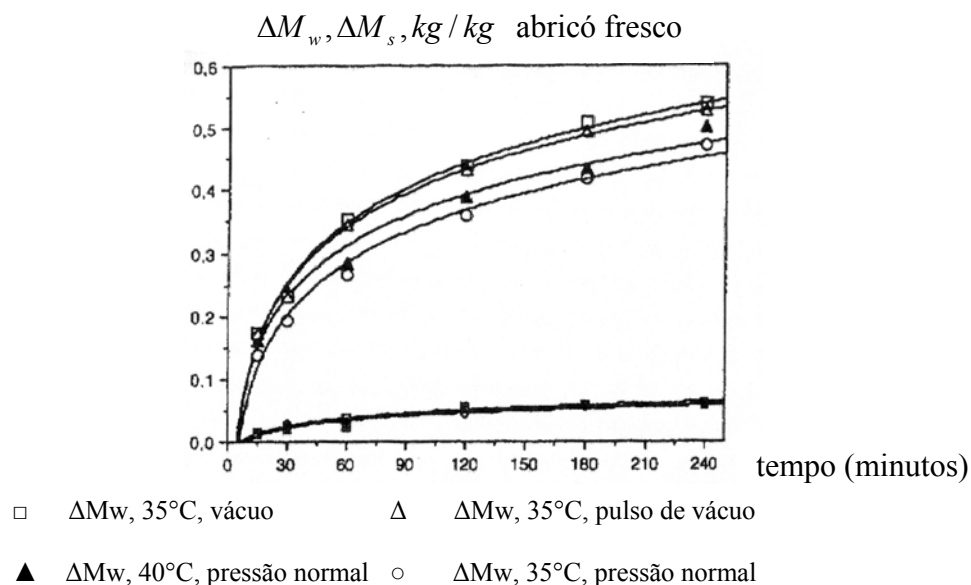


Figura 2.16 – O comportamento de perda de água de amostras de abricós, em tratamentos diferentes (solução de açúcar: 65°Brix; vácuo: 100 mb) (SHI & FITO, 1993).

Ao compararmos a perda de água a 40°C e a pressão atmosférica com aquelas a 35°C e a vácuo ou a pulso de vácuo, reparamos que a perda de água é sempre maior nos tratamentos em que ocorre aplicação de vácuo. Entretanto, nota-se que o tratamento a pulso de vácuo implicou em perdas de água um pouco inferiores àquelas a vácuo.

Shi e Fito (1993) realizaram todos os tratamentos de desidratação osmótica, sob três diferentes condições de pressão: pressão atmosférica normal, vácuo (10 kPa) e pulso de vácuo. Na condição de pulso de vácuo, tratamento a vácuo (10 kPa), por 5 minutos, e tratamento a pressão normal, por 25 minutos, foram usados. Shi e Fito (1994) também realizaram todos os experimentos de desidratação osmótica, sob três condições: pressão atmosférica, vácuo (10^4 Pa) e pulso de vácuo. Mais recentemente, Giraldo et al. (2003) realizaram tratamentos de desidratação osmótica a pulso de vácuo, aplicando 5,0 kPa, durante os 10 primeiros minutos de processamento, a fim de promover a impregnação a vácuo das amostras com a solução osmótica. Barat et al. (2001) também trabalharam com pulsos de vácuo, em experimentos de desidratação osmótica de fatias de maçã.

Hofmeister (2003) implantou a linha de pesquisa sobre impregnação a vácuo em alimentos porosos no laboratório de propriedades físicas do departamento de engenharia química e de alimentos da UFSC. Alguns resultados importantes acerca do comportamento de frutas, frente aos tratamentos a vácuo, foram obtidos e uma técnica que permite a visualização do líquido impregnado foi desenvolvida. Esta técnica consiste em usar uma solução colorida de azul de metileno (0,4g/L) como um meio líquido no qual as frutas são

imersas. Enquanto a pressão atmosférica é restabelecida, se houver penetração da solução nas frutas, haverá um tingimento de seus tecidos internos. Isso pode ser evidenciado, cortando-se as frutas ao meio: caso tenha havido penetração (impregnação a vácuo), o tecido da fruta estará colorido até onde a solução entrou. Com esta técnica, a pesquisadora constatou que houve penetração de água colorida em maçã submetida a 12 minutos aplicando-se intermitentemente uma pressão absoluta de 13,3 kPa, e que não houve a entrada de água colorida nas frutas (maçã e abacaxi) a pressão atmosférica, nem aos 33 minutos.

As análises de umidade têm sido realizadas gravimetricamente (BARAT et al., 2001; CHÁFER et al., 2003; SHI & FITO, 1993; SHI & FITO, 1994; GIRALDO et al., 2003).

A concentração de sólidos solúveis tem sido obtida por refratometria (GIRALDO et al., 2003; SACCHETTI et al., 2001; MÚJICA-PAZ et al., 2003; BARAT et al., 2001).

A atividade de água tem sido medida através de um equipamento de ponto de orvalho (Decagon, modelo CX-1) a 25°C (MÚJICA-PAZ et al., 2003, GIRALDO et al., 2003).

As densidades das amostras têm sido obtidas por deslocamento de volume em picnômetros, usando as respectivas soluções isotônicas como os líquidos de referência (CHÁFER et al., 2003; MÚJICA-PAZ et al., 2003; GIRALDO et al., 2003).

As densidades reais também têm sido obtidas desta maneira, mas, nesse caso, há uma prévia degaseificação da amostra imersa no líquido contido no picnômetro, pela aplicação de vácuo (10 kPa durante 30 minutos) (CHÁFER et al., 2003; MÚJICA-PAZ et al., 2003; GIRALDO et al., 2003).

As porosidades das amostras têm sido determinadas a partir dessas densidades, uma vez que a diferença entre elas é apenas o ar que não está presente na densidade real (CHÁFER, et al., 2003; MÚJICA-PAZ et al., 2003; GIRALDO et al., 2003).

Mújica-Paz et al.(2003) compararam os valores de porosidade efetiva obtidos pelo método descrito por Fito e Pastor (1994) com os valores obtidos através das densidades real e aparente. Cháfer et al., (2003) relataram que, para todas as frutas testadas, os valores de porosidade efetiva, obtidos pelo método descrito por Fito et al., (1996), foram similares àqueles determinados usando picnometria.

A operação básica do processo de desidratação osmótica permanece essencialmente similar àquela descrita por Ponting (1973) em que operações são realizadas em um sistema de circulação de solução, a temperatura estável e a pressão atmosférica. Existe uma série

de especificações referentes ao equipamento, destacando-se a sua parte funcional onde se dá o contato entre a fase sólida (alimento) e a fase líquida (solução concentrada) (MAROUZÉ, et al., 1994). Uma dessas funções é viabilizar o contato do alimento com a fase líquida, que é uma solução com alta concentração de solutos. Tal função exige observância de alguns critérios, a saber: a criação de um movimento relativo entre a solução e o alimento, caracterizado pela velocidade relativa e pela homogeneidade para todos os alimentos; a ausência de danos mecânicos aos alimentos; controle do tempo de tratamento; capacidade para aceitar diferentes formas de alimentos; redução da relação entre a massa de solução e a massa de alimento. As outras funções são: permitir o controle dos parâmetros do processo (temperatura dos alimentos e da solução, concentração da solução, pressão estática do alimento e da solução e agitação) e ter um custo razoável de construção (MAROUZÉ et al., 2001).

2.2 - MECANISMO HIDRODINÂMICO - HDM

Inicialmente proposto por Fito e Pastor em 1994, o mecanismo hidrodinâmico estabelece uma relação simples entre pressões utilizadas no seu processo e o percentual de impregnação dos alimentos. A descrição desse mecanismo é dada pelo desenvolvimento, a seguir, e é acompanhada por ilustrações que auxiliam a sua compreensão.

A Figura 2.17, mostra um espaço intercelular ou poro que pertence a um alimento sólido poroso e que foi idealizado como um cilindro de diâmetro D e comprimento z , constantes, preenchido por ar. O sólido encontra-se submerso em meio líquido, de maneira que a pressão interior do gás será p_i , e a pressão exterior, p_e . A última pressão será igual à pressão do sistema, p_2 , acrescida da pressão capilar, p_c , podendo esta última ser calculada mediante a equação de Young-Laplace:

$$p_c = \frac{8\sigma}{D^2} \quad (2.1)$$

onde σ , é a tensão superficial do líquido.

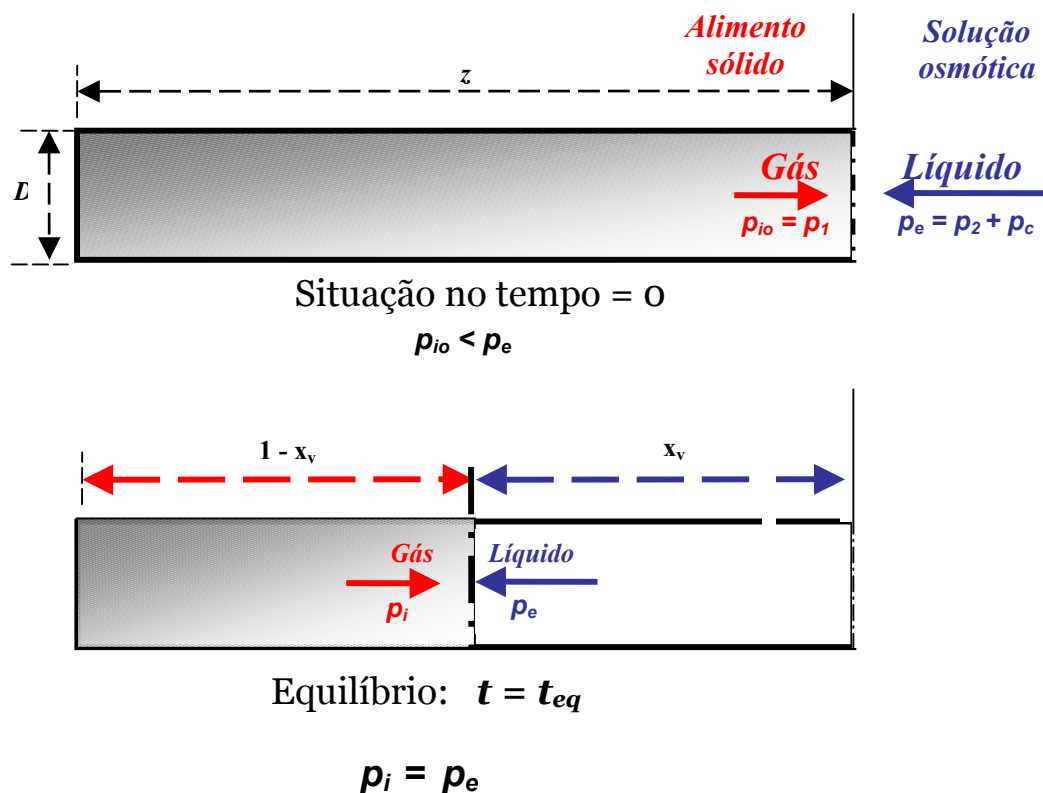


Figura 2.17 – Esquema de atuação do HDM em um poro (FITO & PASTOR, 1994).

Numa abordagem simplificada, a penetração do líquido em um poro ocorre devido aos gradientes de pressão, que podem ser calculados pela equação de Poiseille:

$$-\Delta p + \frac{32\mu z^2}{D^2} x_w \frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

onde μ é a viscosidade do líquido e x_v é a fração do volume do poro impregnada pela solução. O gradiente de pressão ou força impulsora diminui decorrente do aumento de p_i à medida que o gás é comprimido. Assumindo uma compressão isotérmica de um gás ideal, tem-se a seguinte equação:

$$-\Delta p = p_e - \frac{p_{io}}{(1 - x_v)} \quad (2.3)$$

Onde p_{io} é o valor inicial da pressão do gás.

Das equações (2.2) e (2.3.), tem-se:

$$p_e - \frac{p_{io}}{(1 - x_v)} + \frac{32\mu z^2}{D^2} x_v \frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

A condição de equilíbrio será atingida quando as pressões p_e e p_i se tornarem iguais. Neste instante, o menisco se estabiliza e tem-se:

$$\frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

Das equações (2.4) e (2.5), o valor de x_v pode ser expresso como:

$$x_v = \frac{(p_e - p_{io})}{p_e} \quad (2.6)$$

Considerando que

$$p_e = p_2 + p_c \quad (2.7)$$

e

$$p_{io} = p_1 \quad (2.8)$$

e substituindo (2.7) e (2.8) em (2.6), pode-se expressar x_v como:

$$x_v = \frac{(p_2 + p_c - p_1)}{(p_2 + p_c)} \quad (2.9)$$

Quando gradientes de pressão não são impostos ao sistema, $p_1 = p_2$, e a única força motriz é a pressão capilar, p_c . Neste caso:

$$x_v = \frac{p_c}{(p_2 + p_c)} \quad (2.10)$$

A equação (2.9) pode ser escrita de forma mais simplificada, ou seja:

$$x_v = 1 - \frac{1}{r} \quad (2.11)$$

Onde r é a relação de compressão real, dada por:

$$r = \frac{(p_2 + p_c)}{p_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right) + \left(\frac{p_c}{p_1} \right) \quad (2.12)$$

onde $R = \frac{p_2}{p_1}$ e $p_r = \frac{p_c}{p_1}$ podem ser definidas como a relação de compressão aparente e a

de pressão capilar reduzida, respectivamente, e deste modo:

$$r = R + p_r \quad (2.13)$$

Em muitos casos p_r é muito menor que R , então se pode assumir que $r = R$.

Considerando que o fenômeno descrito acontece igualmente em todos os poros, ou seja; que a fração do volume dos poros de um alimento impregnada é igual a fração do

volume de qualquer poro impregnada (x_v), pode-se determinar a fração do volume do alimento impregnada. Para tanto, basta multiplicar-se x_v pela porosidade efetiva. O significado físico desta operação é a multiplicação da fração do volume dos poros de um alimento impregnada pela solução pela fração do volume da fruta que correspondem aos poros o que é a fração do volume do alimento impregnada pela solução, como pode ser visto pela expressão 2.14.

$$x = \varepsilon_e x_v \quad (2.14)$$

Na Figura 2.18, visualizam-se os valores de x_v encontrados segundo a equação (2.11), em função de R e p_r . A curva correspondente a $R = 1$ descreve somente o efeito da capilaridade, quando o sistema é submetido a gradientes de pressão. Verifica-se que os valores de x_v diminuem à medida que p_r diminui. Entretanto, quando p_r aumenta (por exemplo, quando se trabalha com baixas pressões), o valor de x_v aumenta, significativamente. Este aumento é muito expressivo, quando se impõe um gradiente externo de pressão ($R > 1$), como pode ser observado na Figura 2.18.

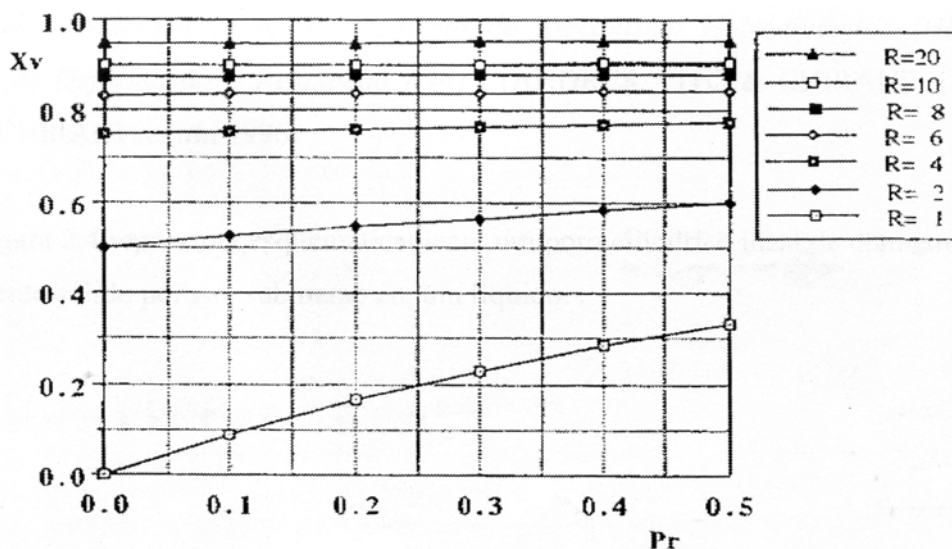


Figura 2.18 – Valores de x_v segundo a equação (2.11), para diferentes valores de p_r e R (FITO & PASTOR, 1994).

Como pode ser visto na Figura 2.18, para valores grandes de R , a pressão capilar reduzida pouco influi sobre os valores de x_v o que significa, em última instância, que a pressão capilar pouco contribui para esses valores e, portanto, pode ser desprezada.

Ocorre uma grande transferência hidrodinâmica de solução para o interior das amostras quando a pressão atmosférica é restabelecida nos processos a vácuo o que se encontra evidenciado nas curvas da Figura 2.2. Os fenômenos difusivo e osmótico são

intensificados neste momento devido a impregnação a vácuo causar um aumento da superfície de transferência ao promover o contato da solução externa com superfícies internas dos poros do alimento.

2.2.1 - ACOPLAMENTO DOS FENÔMENOS DE DEFORMAÇÃO – RELAXAÇÃO (DRP) AO MECANISMO HIDRODINÂMICO (HDM).

Ao se analisarem resultados obtidos com experimentos de desidratação osmótica, observou-se que o Mecanismo Hidrodinâmico (HDM) ocorre simultâneo aos Fenômenos de Deformação – Relaxação (DRP), interferindo na cinética e na condição de equilíbrio final do sistema (FITO, ANDRÉS, CHIRALT, et al., 1996). A maneira como o HDM e o DRP se desenvolvem (maior ou menor deformação/impregnação) depende da microestrutura dos alimentos e de suas propriedades mecânicas, e ambos os fenômenos podem acarretar variações significativas na eficiência da impregnação (ANDRÉS, FITO & CHIRALT, 1995).

Modelo Matemático do Acoplamento dos Fenômenos de Deformação – Relaxação (DRP) ao Mecanismo Hidrodinâmico (HDM) (FITO et al., 1996)

A Figura 2.19 representa, esquematicamente, um poro cilíndrico ideal de diâmetro constante, de um alimento sólido poroso, submerso em um líquido.

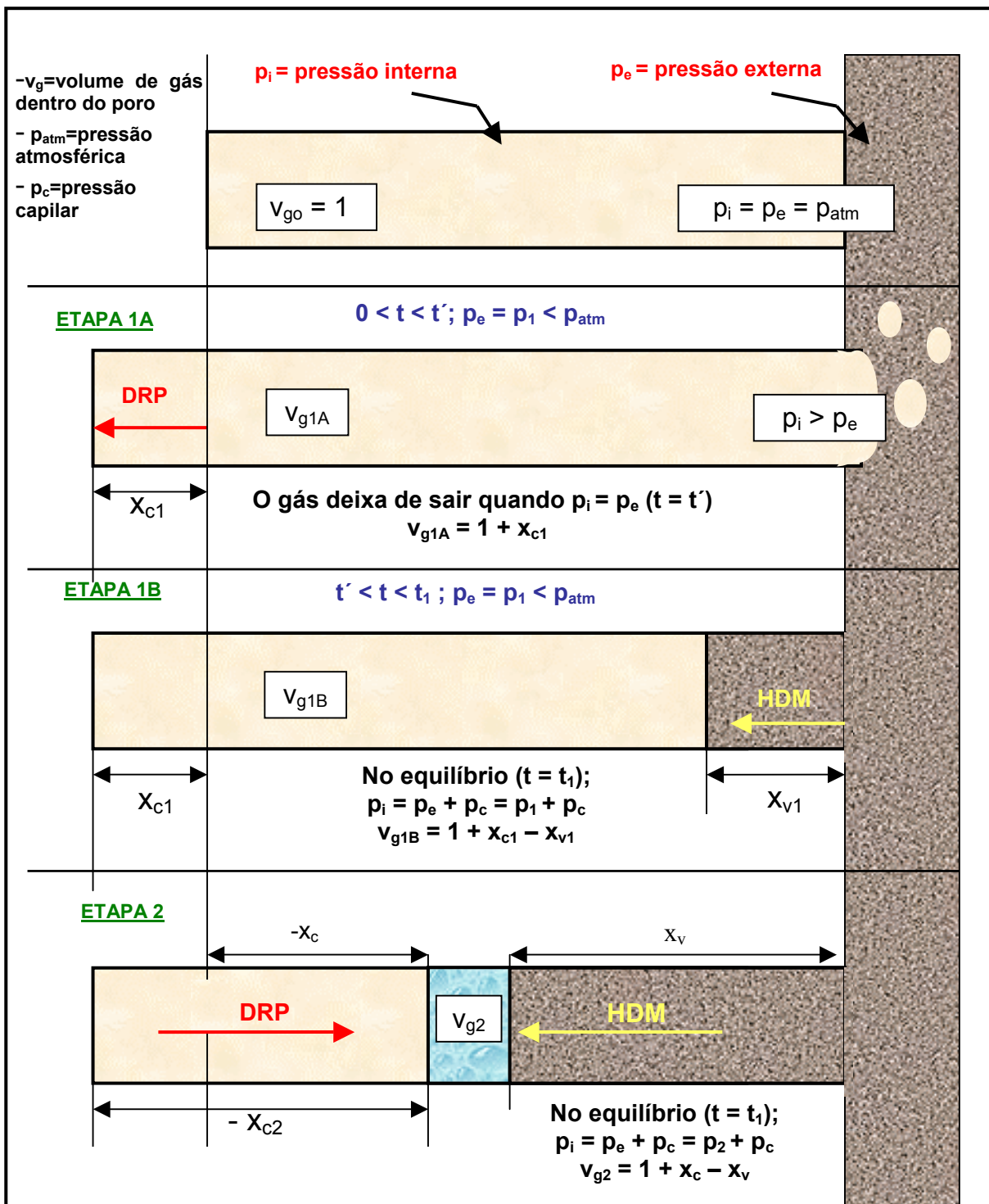


Figura 2.19 – Sistema sólido-líquido: evolução da Relaxação-Deformação e HDM, em um poro ideal (FITO et al., 1996).

O volume de gás contido no interior do poro quando $t = 0$, antes de qualquer interação sólido-líquido, tem como valor de referência:

$$v_{go} = 1 \quad (2.15)$$

A relação entre o volume total de gás numa amostra e o volume desta amostra, em $t = 0$, define-se como porosidade efetiva e é expressa pela equação abaixo:

$$\varepsilon_e = \frac{V_{go}}{V_o} \quad (2.16)$$

Durante uma operação de Impregnação a Vácuo, o sistema é submetido a uma pressão subatmosférica (vácuo – p_i), durante um tempo t_1 (Figura 2.19). Estas condições provocam a expansão do gás contido no interior dos poros, uma saída parcial do mesmo e uma certa deformação da matriz sólida (etapa 1A, na Figura 2.19), aumentando o valor de v_g . Quando p_i se iguala a p_e ($t = t'$), a saída do gás do interior destes poros é interrompida, cessando, também, o processo de deformação. Disto resulta o aumento do volume gasoso no interior dos poros (x_{c1}), conseqüente à deformação (DRP), alcançando um valor de x_{c1} :

$$v_{g1A} = 1 + x_{c1} \quad (2.17)$$

Neste momento, ocorre o HDM e o líquido externo começa a entrar no poro devido à pressão capilar (etapa 1B, na Figura 2.19).

O gás residual se comprime e uma nova situação de equilíbrio é alcançada quando $p_i = p_1 + p_c$ ($t = t_1$). Nenhuma deformação ocorre na matriz sólida, entre os tempos t' e t_1 . No equilíbrio, o volume de gás diminuído é conseqüente à penetração, por HDM (x_{v1}), de igual volume de líquido, expresso em:

$$v_{g1B} = 1 + x_{c1} - x_{v1} \quad (2.18)$$

Finalmente, quando a pressão atmosférica é restaurada, no sistema ($p_e = p_2$), as forças, devido às diferenças entre a pressão externa e a interna, podem produzir tanto deformações na matriz sólida quanto impregnação pelo HDM (etapa 2 na Figura 2.19). Da mesma forma que antes, qualquer variação no volume da amostra (devido a variações na pressão externa) é atribuída, unicamente, a variações no volume de gás interno. No equilíbrio $t = t_2$, a variação de volume e a penetração de líquido no poro, durante a etapa 2, será x_{c2} e x_{v2} , respectivamente.

A penetração do líquido pelo HDM, x_v e a deformação da matriz sólida, x_c , ao longo da operação de impregnação a vácuo, podem ser calculadas como:

$$x_v = x_{v1} + x_{v2} \quad (2.19)$$

$$x_c = x_{c1} + x_{c2} \quad (2.20)$$

Os valores dos volumes de gás nos poros, depois da etapa 2 (Figura 2.19), é definida assim:

$$v_{g2} = 1 + x_c - x_v \quad (2.21)$$

O valor de qualquer variável, referida a um poro ideal, pode ser estendida ao volume total da amostra, ao se multiplicá-lo por sua porosidade efetiva (ε_e). É desta forma que são definidos os percentuais de impregnação e de deformação das amostras:

$$x = \varepsilon_e x_v \quad (2.22)$$

$$\gamma = \varepsilon_e x_c \quad (2.23)$$

onde, x_v é a penetração total do líquido e x_c , a deformação da matriz sólida.

Pode-se também definir a penetração e a deformação por unidade de volume de amostra, mediante as equações:

$$x = x_1 + x_2 \quad (2.24)$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (2.25)$$

O fenômeno de deformação da matriz sólida é seguido de uma relaxação devido ao comportamento viscoelástico da matriz.

Evidencia-se, assim, que o acoplamento de ambos os fenômenos, HDM e DRP, afetará, significativamente, os valores de x e y .

O HDM considera isotérmica a compressão do gás no interior do poro. Tal compressão ocorre antes do alcance do estado de equilíbrio e é gerada pela variação de pressão no sistema sólido-líquido. Assim:

$$\frac{v_{g_{j+1}}}{v_{g_j}} = \frac{p_{i_j}}{p_{i_{j+1}}} \quad (2.26)$$

Esta equação só tem aplicabilidade quando não ocorre a saída de gás entre t_j e t_{j-1} . Este critério pode, também, ser utilizado para determinar as relações entre x , y e as variações de operação, em cada uma das etapas mostradas na Figura 2.19. A saber:

a) Para $t = t_1$ (etapa 1 B), da equação (2.26):

$$\frac{v_{g1B}}{v_{g1A}} = \frac{p_i}{p_1 + p_c} = \frac{1}{r_1} = \frac{1 + x_{c1} - x_{v1}}{1 + x_c} \quad (2.27)$$

Isto implica que:

$$\frac{x_{v1}}{1+x_{c1}} = 1 - \frac{1}{r_1} \quad (2.28)$$

Utilizando o valor de ε_0 , tem-se que:

$$x_1 = (\varepsilon_e + \gamma_1) \left(1 - \frac{1}{r_1} \right) \quad (2.29)$$

Podendo ser definido o valor da porosidade eficaz ε_{e1} em $t = t'$, ou seja:

$$\varepsilon_{e1} = \varepsilon_e + \gamma_1 \quad (2.30)$$

Assim, a equação de equilíbrio, para a etapa 1, resulta em:

$$x_1 - \gamma_1 = \varepsilon_e \left(1 - \frac{1}{r_1} \right) - \frac{\gamma_1}{r_1} \quad (2.31)$$

b) De maneira similar, para a etapa 2 (Figura 2.19), a equação (2.26) pode ser aplicada entre $t = t'$ e $t = t_2$:

$$\frac{v_{g2}}{v_{g1A}} = \frac{p_1}{p_2 + p_c} = \frac{1}{r_2} = \frac{1+x_c - x_v}{1+x_{c1}} \quad (2.32)$$

que, multiplicando-se por ε_e , obtém-se:

$$x - \gamma = \varepsilon_e \left(1 - \frac{1}{r_2} \right) - \frac{\gamma_1}{r_2} \quad (2.33)$$

Esta é a equação do equilíbrio para o HDM acoplado ao DRP e é válida para operações sólido-líquido a vácuo. Esta pode ser utilizada, também, para calcular os valores de ε_e , e a partir dos valores experimentais de x , γ e γ_1 :

$$\varepsilon_e = \frac{(x - \gamma)r_2 + \gamma_1}{r_2 - 1} \quad (2.34)$$

A determinação experimental de γ_1 não é fácil. No entanto, quando se trabalha com pressões relativamente baixas, r_2 é alto, por isso:

$$(x - \gamma)r_2 \gg \gamma_1 \quad (2.35)$$

Então, como uma primeira abordagem, na maioria dos casos, pode ser aceito:

$$\varepsilon_e \cong \frac{x - \gamma}{\left(1 - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (2.36)$$

Quando não ocorre deformação, logo $\gamma =$ zero, as equações tornam-se:

$$x = \varepsilon_e \left(1 - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.37)$$

Que é o modelo inicialmente proposto por Fito e Pastor (1994) e que não considera as deformações.

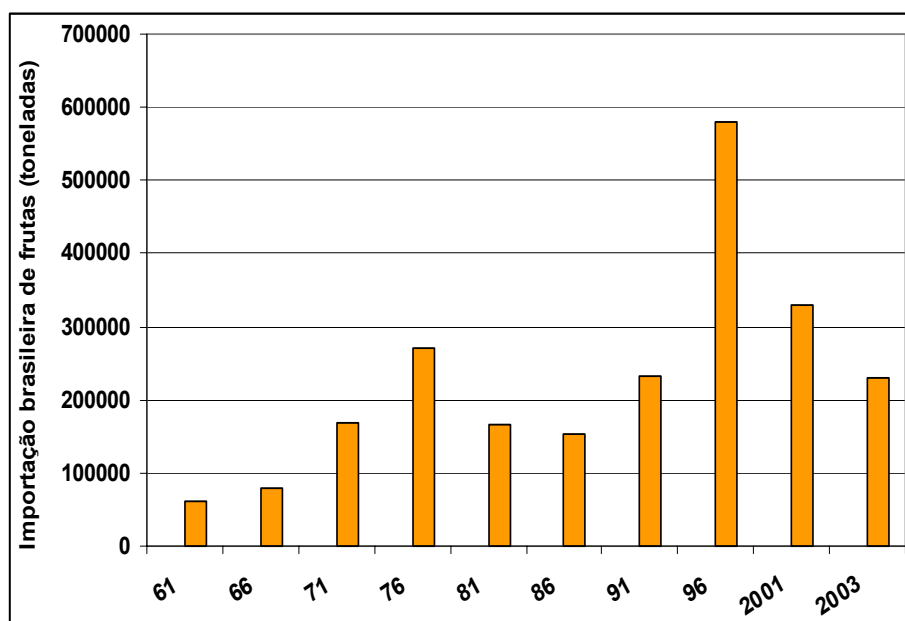
2.3 - PÊRA ARGENTINA

A importação brasileira de frutas variou de 61.531 toneladas, no ano de 1994, para 229.622 toneladas, no ano de 2003 (Jornal da fruta, 2004).

Na Tabela 2.3 e nas Figuras 2.20 e 2.21, aparecem as quantidades de frutas importadas pelo Brasil, no período de 1961 a 2003, sendo evidenciada, na última figura, apenas a importação da pêra, objeto deste estudo.

Tabela 2.3 – Importação brasileira de frutas, em toneladas, segundo a FAO e o MDIC, 2004.

	1961	1966	1971	1976	1981	1986	1991	1996	2001	2003
Total	61531	78686	168746	270301	166381	153281	231865	580354	329684	229622
Pêra	7510	11051	22482	39995	31742	31967	60878	63024	117644	62973
Maçã	43230	56587	121350	189478	112563	83931	94251	257142	65921	42382
Vinho	1626	635	1799	5947	4462	8213	8423	23383	29871	29338
Uva passa	1268	1695	2504	3526	3241	7849	10643	15254	16408	15023
Ameixa	873	935	3003	1693	1592	1867	8389	33931	16088	13522
Pêssego e nectarina	43	0	1766	6064	0	163	2148	28574	7858	11638
Outras preparadas	470	331	1509	6449	1669	1965	10008	52111	21367	11326
Ameixa seca	2561	2875	4608	7076	5679	10197	10172	11750	11447	10442
Uva	1964	2356	4776	4653	1820	2036	12132	29142	7457	7612
Castanha	0	0	1	0	0	5	4	15	2	6265
Coco seco	0	0	0	0	0	169	5465	8014	7527	4519
Kiwi	0	0	0	0	0	0	0	0	9369	4240
Cereja	102	99	408	574	270	349	893	3584	1031	2701
Suco de uva	0	0	0	0	0	0	620	1876	2807	2245
Outras	1884	2122	4540	4846	3343	4570	7827	50538	13911	4526

**Figura 2.20** – Importação brasileira de frutas, em toneladas, segundo a FAO e o MDIC, 2004.

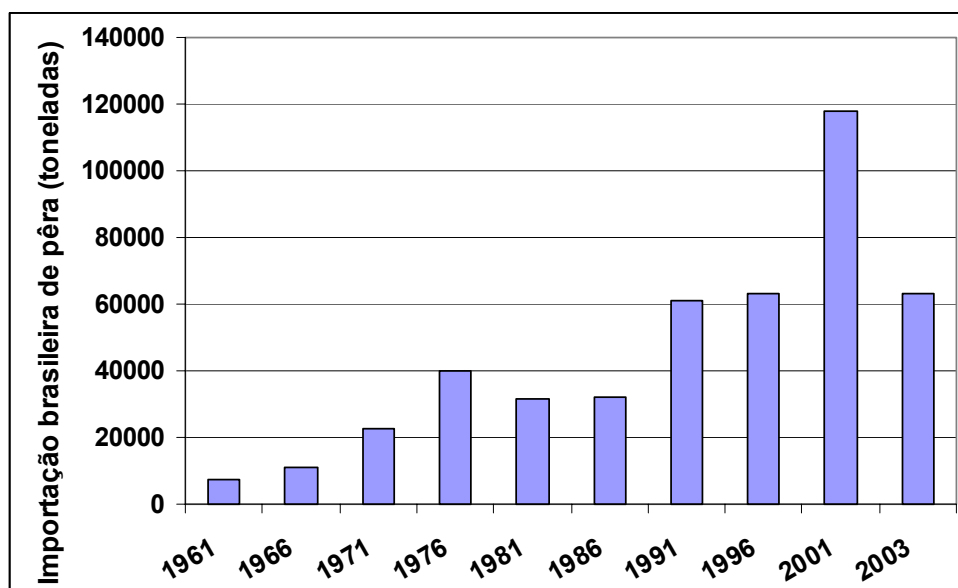


Figura 2.21 – Importação brasileira de peras, em toneladas, segundo a FAO e o MDIC, 2004.

A pêra, que era a segunda fruta mais importada no ano de 1994, teve a sua demanda muito aumentada nos anos seguintes, sendo que, em 1997, superou a maçã, mantendo a posição de fruta mais importada pelo Brasil até o ano de 2003.

A maçã era a fruta mais importada pelo Brasil até o ano de 1994 atingindo a sua maior cifra de importação em 1996, porém diminuiu a quantidade, a partir deste ano, em 42382 toneladas em 2003, ocupando a segunda posição entre as frutas compradas pelo país. A importação brasileira de frutas em dólares foi de 10351000 no ano de 1961 e passando para 200669000 no ano de 2003. A pêra que no ano de 1961 ocupava o terceiro lugar no valor de importação com apenas 860000 dólares em 1996 quando foi observado o seu maior valor na importação em todo o período e colocando-se em primeiro lugar com o montante de 98458000 de dólares. A maçã que era a fruta importada em maior quantidade e valores pelo Brasil até o ano de 1994, foi superada pela pêra no ano de 1996 (JORNAL DA FRUTA, 2004).

Na Tabela 2.4 encontram-se registros sobre a importação brasileira de frutas, em dólares, no período de 1961 a 2003.

Tabela 2.4 – Importação brasileira de frutas, em dólares segundo a FAO e o MDIC, 2004.

	1961	1966	1971	1976	1981	1986	1991	1996	2001	2003
Total	10351	18651	47923	125229	120766	109127	203597	454599	245351	200669
Vinho	887	439	1629	6625	7733	11947	17707	43010	72077	68442
Pêra	860	2351	6301	17763	21735	16001	40367	98458	49516	29356
Castanhas	0	0	2	0	0	48	60	67	20	16910
Maçã	5637	11531	29292	78881	68424	51310	64439	87969	29234	15825
Uva passa	603	1106	1709	3648	5707	8935	12353	19413	12237	13553
Outras preparadas	138	135	559	3531	2560	1855	10577	46650	18685	10823
Ameixa seca	1055	1178	2388	3689	6478	9033	14655	18971	11974	9904
Ameixa	174	326	1254	1168	1917	2130	9396	29357	11539	7875
Pêssego / nectarina	9	0	661	2818	0	198	2544	20101	5661	6858
Uva	390	810	2067	3900	2480	1919	12717	31769	6080	5083
Kiwi	0	0	0	0	0	0	0	0	6100	3462
Coco seco	0	0	0	0	0	114	6912	9353	4976	3223
Cereja	55	80	453	989	753	1023	2371	6596	3424	2331
Damasco seco	0	0	0	0	484	611	993	1736	1255	1895
Outras	543	695	1608	2217	2495	4003	7875	39730	10176	4129

***CAPÍTULO III –
MATERIAL E MÉTODOS***

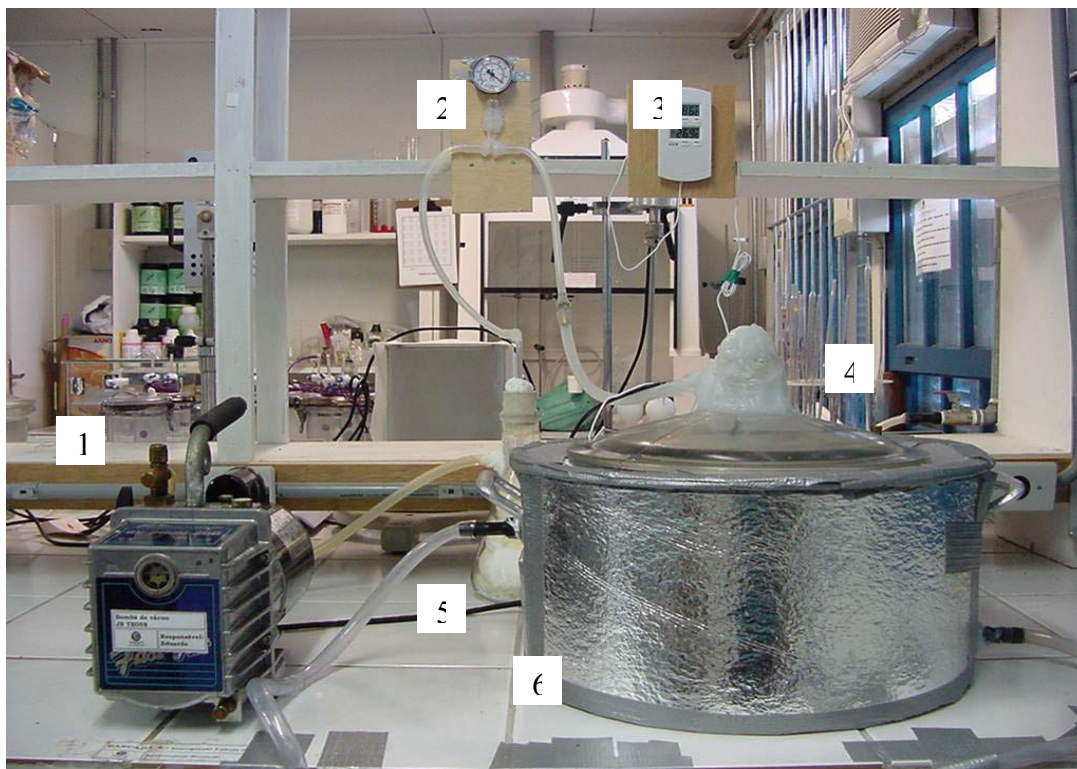
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo aborda o dispositivo experimental, as soluções utilizadas, a fruta escolhida, as diversas maneiras de seu preparo, os tratamentos específicos aplicados em cada etapa, às análises realizadas e os demais equipamentos e utensílios empregados.

Cada uma das três etapas em que se divide este trabalho teve uma solução, modo de preparo, temperatura e pressões específicas sendo, todas, entretanto, realizadas com o mesmo aparato experimental.

3.1 – EQUIPAMENTO

A unidade experimental consistiu de um dessecador de 300 mm de diâmetro (câmara de vácuo) conectado a uma bomba de vácuo e inserido em um recipiente termicamente isolado. Pelo interior do recipiente circulava água bombeada por um banho responsável pela regulação térmica. No interior do dessecador, havia uma sonda para monitoramento da temperatura que era lida em um termômetro digital e uma pequena bomba que mantinha a agitação constante da solução. A pressão era lida em um vacuômetro situado na linha. O tempo era monitorado por um cronômetro. Um dispositivo de metal mantinha as amostras uniformemente distribuídas e imersas. A Figura 3.1 representa o equipamento.



onde: 1–bomba de vácuo; 2–vacuômetro; 3–termómetro; 4–câmara de vácuo; 5–sistema de aquecimento/resfriamento; 6–isolamento térmico.

Figura 3.1 – Equipamento usado nas operações sólido-líquido.

3.2 – SOLUÇÕES UTILIZADAS

Três diferentes soluções, que caracterizaram as diferentes etapas desta pesquisa, foram utilizadas: solução hipertônica de sacarose, solução de azul de metileno e solução isotônica de sacarose. A primeira foi utilizada nos experimentos de desidratação, enquanto que as duas últimas foram usadas nas fases de impregnação.

A solução hipertônica foi obtida dissolvendo-se sacarose, açúcar refinado adquirido no comércio local, em água destilada até a concentração de 60°Brix - que está dentro da faixa de °Brix utilizada na literatura e que não permite segundo Barat et al. (2001) resistência ao processo de desidratação devido a atividade fisiológica celular. Assim como Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994) que também estudaram as diferenças entre os fenômenos a vácuo e a pressão atmosférica, essa concentração de sacarose foi usada em todos os experimentos. A solução colorida foi preparada mediante dissolução de azul de metileno em água destilada, garantindo, assim, uma concentração de 0,4g/L (conforme formulado por Hofmeister, 2003). A solução isotônica resultou da solubilização de sacarose, de modo a alcançar a mesma atividade de água da fruta, como descrito por MÚJICA-PAZ et al. (2003).

3.3 – PÊRA ARGENTINA

Peras argentinas (variedade Buerre D'Anjou) foram usadas para todos os experimentos. As frutas eram selecionadas buscando-se sempre o mesmo aspecto no produto fresco, a fim de assegurar o máximo de uniformidade possível entre as amostras. A preparação das amostras se deu de diferentes maneiras de acordo com os tratamentos realizados.

Para os ensaios desidratação osmótica, as peras foram descascadas, descaroçadas e cortadas em fatias gerando amostras uniformes. Um tubo de pvc, 24 mm de diâmetro interno, amolado nas extremidades, era usado para o descaroçamento de forma que a remoção dessa estrutura ocorria sem danos às frutas. Duas placas amoladas, paralelas, de metal, distantes por 13 mm e fixadas por parafusos eram usadas para fatiar, perpendicularmente à direção ápice-base, as frutas. Um cilindro metálico de 58 mm de diâmetro interno, amolado nas extremidades, era usado para conferir essa dimensão aos diâmetros externos das fatias. Quatro fatias de pêra foram usadas para cada tempo.

Para os experimentos de visualização de impregnação com azul de metileno, as peras foram inicialmente apenas cortadas ao meio. Num segundo momento, foram descascadas, cortadas em quartos e descaroçadas. Por último, descascadas, cortadas ao meio e descaroçadas.

Para os ensaios impregnação a vácuo, as peras foram preparadas da mesma forma que para os experimentos de desidratação osmótica. Entretanto, neste caso, as fatias eram medidas com o paquímetro de forma que suas dimensões eram, assim, mais precisamente determinadas. Quatro fatias de pêra também foram usadas para cada tempo.

3.4 – Tratamentos

3.4.1 – Desidratação osmótica

Solução de sacarose a 0,60 (p/p), usada em todos os experimentos, foi preparada com açúcar comercial e água destilada. Os tratamentos foram realizados a 30°C e a 40°C (encontra-se dentro da faixa de temperatura utilizada na literatura). As pressões sob as quais as amostras foram tratadas eram iguais à atmosférica ou a 2,7 kPa (pressão menor que a encontrada na literatura e adotada a fim de se conseguir percentuais de impregnação e fluxos capilares maiores). Algumas eram integralmente tratadas sob pressão atmosférica, enquanto outras eram, da mesma forma, tratadas sob 2,7 kPa (pressão absoluta). O restante das amostras era submetido aos 2,7 kPa, durante os cinco primeiros minutos de tratamento,

após os quais, a pressão atmosférica era rapidamente restabelecida, assim permanecendo até o final do tratamento. Os tratamentos a pressão atmosférica foram designados pela sigla DO (Desidratação Osmótica), os integralmente realizados sob 2,7 kPa (pressão absoluta) foram designados pela sigla DOV (Desidratação Osmótica a Vácuo) e aqueles onde houve a aplicação de vácuo durante os cinco primeiros minutos, pela sigla DOPV (Desidratação Osmótica a Pulso de Vácuo). Entende-se integralmente realizados sob 2,7 kPa (pressão absoluta) como tratamentos realizados sob vácuo onde o tempo de relaxação adotado foi de 1 minuto, aproximadamente.

Os tempos de processamento foram 0, 15, 30, 45, 60, 120, 180 e 240 minutos, com triplicatas para cada tempo. Segundo MAROUZÉ et al. (2001) os tratamentos osmóticos podem ser curtos, abaixo de 1 hora (desidratação de frutas), longos, acima de 1 hora ou ainda muito longos (2 a 4 horas). A razão solução-fruta foi suficientemente grande (50:1) (assim como usado por BARAT et al. (2001)), para evitar mudanças significativas na concentração da solução, durante os processos. A circulação da solução osmótica foi ajustada, de maneira a assegurar que a resistência à transferência de massa da fase líquida fosse desprezível.

O processamento consistiu em imergir as amostras de pêra na solução contida na câmara de vácuo e em mantê-las uniformemente submersas, com o auxílio do dispositivo metálico, durante os diferentes intervalos de tempo. No caso dos tratamentos a vácuo, a redução da pressão começava imediatamente após a imersão e o fechamento do dessecador; os tratamentos a pressão atmosférica e aqueles nos quais esta pressão, após o pulso de vácuo, era mantida até o final do tratamento, eram realizados com equipamento fechado para evitar evaporação. Após serem retiradas da solução, as quatro fatias correspondentes àquele tempo eram secas com papel absorvente e, então, analisadas. Todos os ensaios foram feitos em triplicatas.

3.4.2 – Impregnação a vácuo: visualização com azul de metileno

Solução de azul de metileno a 0,4 g/L, usada em todos os experimentos, foi preparada com reagente P.A. (Merck) e água destilada. Os tratamentos foram realizados a 20°C para dificultar ao máximo a transferência de massa nas operações de impregnação a vácuo. As pressões sob as quais as amostras foram tratadas eram iguais à atmosférica ou a 1,3 kPa (pressão absoluta). Algumas amostras eram tratadas somente a pressão atmosférica, enquanto as outras eram integralmente tratadas a 1,3 kPa (pressão absoluta). Diferentes tempos de imersão foram adotados, de acordo com as fases dos experimentos de

impregnação: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 80, 90, 180 minutos (está dentro da faixa de tempo utilizada por Hofmeister (2003)). As mesmas precauções quanto à concentração da solução, quanto à resistência e à transferência de massa foram tomadas. O processamento foi idêntico àquele realizado nos experimentos de desidratação osmótica, com exceção do pulso de vácuo, que não foi realizado nesta parte dos experimentos.

3.4.3– Impregnação a vácuo: solução isotônica e suco

Soluções isotônicas de sacarose foram preparadas mediante dissolução de açúcar comercial em água destilada, até que a mesma atividade de água das amostras fosse atingida. Segundo Fito e Pastor (1994), soluções isotônicas evitam outros mecanismos de transferência de massa que não sejam o HDM. O suco de pêra, também usado como fase líquida, foi preparado a partir de frutas descascadas, descaroadas e trituradas. O material fibroso foi removido por filtração a vácuo. Fito et al. (1996) usaram suco estudando o HDM acoplado ao DRP usando o suco das respectivas frutas como fase líquida para algumas das frutas testadas. As pressões de trabalho usadas nesta pesquisa foram 4,0; 8,0; 21,3; 34,7 e 48,0 kPa que é uma faixa mais baixa que as usadas por Fito e Pastor (1994) e por Fito (1994) (para que a influência da pressão capilar fosse ainda menor que nesses trabalhos). Todos os tratamentos foram conduzidos a 30°C e, assim como Fito e Pastor (1994) e Fito (1994), durante 5 minutos (esses autores constataram que esse tempo foi suficiente para a impregnação das amostras).

A razão entre o volume de solução e o de fruta foi maior que 50:1 e a circulação de solução foi ajustada, de maneira a assegurar a ausência de gradientes de temperatura. As fatias de pêra eram pesadas, rotuladas e tinham suas dimensões medidas. O processamento consistiu em imergir as amostras de pêra na fase líquida contida na câmara de vácuo e, em mantê-las uniformemente submersas, com o auxílio do dispositivo metálico, por 5 minutos, sob uma das pressões. A pressão atmosférica era, então, restabelecida, as amostras retiradas da fase líquida, secas com papel absorvente para retirar o excesso de líquido e repesadas, como descrito por Fito e Pastor (1994). Quatro fatias de pêra foram usadas por tratamento; os ensaios foram feitos em triplicatas.

3.5 – Análises

3.5.1 – Determinações analíticas (desidratação osmótica)

As análises realizadas foram: umidade, conteúdo de sólidos solúveis e atividade de água. A umidade ($g_{\text{água}}/g_{\text{amostra}}$) foi determinada gravimetricamente (Pregnoatto e Pregnoatto, 1985), e o conteúdo de açúcar, através do refratômetro (ABBÊ – Instruterm).

A atividade de água das amostras foi verificada usando o equipamento de ponto de orvalho (Aqualab) a 25°C.

3.5.2 – Análise visual (impregnação a vácuo com azul de metileno)

Após serem secas, as amostras eram cortadas ao meio, expondo a maior face possível. Assim, observavam-se os pontos mais distantes da superfície, garantindo a melhor visão do fenômeno. As frutas eram, então, fotografadas com uma máquina digital evidenciando-se, sempre, as faces de corte.

3.5.3– Determinação da fração do volume impregnada (x) e da fração do volume dos poros impregnada (x_v) (impregnação a vácuo com solução isotônica e com suco)

A densidade da fase líquida era determinada e o cálculo das frações das amostras impregnadas (x das amostras) era feito como descrito por Salvatori (1997), através da equação 3.1:

$$x = \frac{M_f - M_o}{\rho V_o} \quad (3.1)$$

onde M_f é a massa de uma amostra, após o tratamento; M_o é a massa, antes do tratamento; V_o é o volume da amostra que era medido, antes do tratamento e ρ , a densidade da fase líquida.

x_v era calculado desprezando-se a pressão capilar, como feito anteriormente por Fito (1994) de acordo com a equação 3.2:

$$X_v = \frac{p_e - p_{io}}{p_e} \quad (3.2)$$

3.5.4– Determinação da porosidade e das densidades real e aparente

A porosidade da fruta foi estimada a partir de suas densidades real e aparente conforme a expressão (3.3) assim como Cháfer et al. (2003); Giraldo et al. (2003) e Mújica-Paz et al. (2003).

$$\varepsilon = \frac{\rho_r - \rho}{\rho_r} \quad (3.3)$$

A densidade aparente da fruta foi medida por deslocamento de volume em um picnômetro que foi preenchido pela respectiva solução isotônica que era assim usado como líquido de referência. A densidade real também foi obtida por deslocamento de volume, entretanto, neste caso, pela degaseificação prévia da amostra imersa no líquido contido no

picnômetro através da aplicação de vácuo (4,0 kPa por 30 minutos) como Cháfer et al. (2003). As determinações foram feitas em triplicatas.

***CAPÍTULO IV –
RESULTADOS E DISCUSSÕES***

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa são apresentados em duas partes.

4.1 – Na primeira parte, apresentada na forma de artigo, estudou-se o comportamento de peras argentinas durante a desidratação osmótica a vácuo, a pulso de vácuo e a pressão atmosférica, onde estabeleceram-se, os perfis de umidade, de sólidos solúveis e de atividade de água. São discutidas as diferenças entre os fenômenos a vácuo e a pressão atmosférica. Foi realizada, de forma qualitativa, uma investigação acerca dos fenômenos a vácuo e a pressão atmosférica, apresentando as diferenças entre estes fenômenos. Para tal, utilizou-se azul de metileno.

4.2 – A segunda parte da pesquisa também se configura na forma de artigo, onde é apresentado o estudo da impregnação a vácuo de frutas, uma série de experimentos foi realizada, a fim de verificar se o modelo hidrodinâmico proposto por FITO e PASTOR (1994) explica, satisfatoriamente, o comportamento de impregnação em peras argentinas. Face à necessidade de se conhecer não só o comportamento dos alimentos, quando submetidos a vácuo, nas operações sólido-líquido, mas também as suas porosidades efetivas.

São apresentados os resultados de impregnação a vácuo utilizando cinco pressões diferentes: 4.0; 8.0; 21.3; 34.7 e 48.0 kPa, onde cada ensaio foi realizado com quatro fatias de pêra, sob uma dessas pressões e sempre em triplicata. Todos os experimentos foram conduzidos a 30°C, com solução isotônica de sacarose ou com suco da fruta e durante 5 minutos. Determinou-se a porosidade efetiva através das densidades e é apresentada uma discussão acerca do poder de impregnação, quando se trabalha sob vácuo.

ARTIGO 1

DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA A VÁCUO DE FRUTAS

DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA A VÁCUO DE FRUTAS

Bernardo Alberto Marcussi, José Antonio Ribeiro Souza*

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, C.P. 476, 88040-900 – Florianópolis, Brasil.

* jantonio@enq.ufsc.br

Resumo:

Os processos de desidratação osmótica desenvolvem cinéticas diferentes daquelas que ocorrem à pressão atmosférica, quando vácuo é aplicado. Esse fenômeno foi estudado estabelecendo-se as curvas de umidade, sólidos solúveis e atividade de água de pêra argentina perante três tipos de tratamento de pressão: desidratação osmótica a pressão atmosférica (DO), a vácuo (DOV) e a pulso de vácuo (DOPV). Soluções hipertônicas de sacarose a 60°Brix, a 30 e 40°C foram usadas como agente desidratante em tratamentos realizados por 15, 30, 45, 60, 120, 180 e 240 minutos. As diferenças entre os fenômenos a vácuo e a pressão atmosférica ainda foram abordadas qualitativamente através do uso de azul de metileno. Soluções do corante foram usadas para imersão das amostras que eram tratadas por tempos variáveis sob 1,3 kPa (pressão absoluta) ou sob pressão atmosférica e a 20°C. Perdas de água maiores que as que ocorreram à pressão atmosférica foram observadas nos tratamentos onde vácuo foi integralmente aplicado (DOV). Todavia, a aplicação durante apenas os 5 primeiros minutos (DOPV) diminuiu a perda de água. Ambos os tratamentos, DOV e DOPV, possibilitaram acréscimo no ganho de açúcar em relação à pressão atmosférica. A queda da atividade de água aumentou nos tratamentos de DOV, comparada aquela à pressão atmosférica. Contudo, a aplicação de vácuo durante os 5 primeiros minutos diminuiu a queda da atividade de água a 30°C enquanto a aumentou a 40°C, em relação a queda a pressão atmosférica. A aplicação de vácuo revelou-se capaz de causar o transporte do corante para as partes mais internas da fruta que sofreu intensa colorização nesses processos, mesmo após intervalos de tempo muito curtos como, por exemplo, 5 minutos. Esse fenômeno ainda possibilitou deduzir-se que a rede de poros da pêra argentina deve ser interligada. Esta transferência não foi possível nos processos a pressão atmosférica onde a fruta conservou sua cor interna original, mesmo após três horas de imersão.

1 - Introdução

A desidratação osmótica é reconhecida como um método de processamento capaz de gerar produtos de frutas de alta qualidade (SHI & FITO, 1994). Ela reduz a ação enzimática (GIRALDO et al., 2003), reduz a atividade de água e, conseqüentemente, o crescimento microbiano (ROSA & GIROUX, 2001), além de atribuir características organolépticas diversas aos alimentos processados.

O processo osmótico consiste na imersão de alimentos em soluções hipertônicas, dando origem a pelo menos dois fluxos simultâneos em contracorrente: um importante fluxo de água para fora do alimento, em direção à solução e uma transferência simultânea de soluto da solução, para o interior da fruta (SALVATORI et al., 1994). É um processo lento.

Alguns métodos têm sido empregados para acelerar a transferência de água, entretanto, eles são limitados, sendo que alguns, como altas temperaturas e longos tempos de tratamento, podem comprometer a qualidade dos produtos de frutas devido às mudanças ou alterações desfavoráveis no sabor, na cor e na textura (SHI & FITO, 1994).

A desidratação osmótica a vácuo tem sido apresentada como uma alternativa para tornar as condições de processo mais suaves e, ainda assim, conseguir altas taxas de transferência. Alguns estudos a vácuo provam que, sob essa condição, cinéticas de desidratação mais rápidas são obtidas (PASTOR et al., 1992a,b; SHI & FITO, 1993; SHI & FITO, 1994; BARAT et al., 2001; GIRALDO et al., 2003). Desse modo, é possível melhorar a qualidade das frutas desidratadas, mantendo o tempo de tratamento e a temperatura, tão baixos quanto possível (SHI & FITO, 1993).

Muitos trabalhos têm procurado descrever e modelar as transferências que ocorrem durante as desidratações osmóticas a vácuo. Fito e Pastor (1994) propuseram um modelo de impregnação a vácuo e conseguiram verificá-lo, experimentalmente, em diversas frutas. Este modelo ficou conhecido como mecanismo hidrodinâmico (HDM) e tem sido amplamente usado em estudos tais como Fito (1994); Fito et al. (2001). Essa fenomenologia se baseia nas trocas de matéria que ocorrem nos poros dos alimentos perante aos gradientes de pressão impostos ao sistema. As operações a vácuo são realizadas em duas etapas, após a imersão do produto no equipamento contendo a fase líquida. Na primeira, vácuo é aplicado no sistema, promovendo, assim, a expansão e o fluxo de saída do gás presente nos poros do alimento. Na segunda, a pressão atmosférica é restabelecida, gerando um fluxo de entrada do líquido externo na estrutura porosa (FITO et al., 2001). Desta maneira, é possível incorporar, rapidamente, grandes quantidades de

solução, o que não se consegue nos processos a pressão atmosférica. O HDM propicia aos mecanismos difusivo e osmótico disponibilidade de uma superfície interfacial maior. Hofmeister (2003) relatou o uso de uma técnica que permitiu a visualização da solução que havia entrado nas amostras tratadas a vácuo.

Considerando que o efeito mais importante do HDM ocorre, apenas, quando o sistema é recolocado a pressão atmosférica, um novo procedimento foi desenvolvido para as operações de desidratação osmótica a vácuo: desidratação osmótica a pulso de vácuo (FITO et al., 1992). Este processo leva ao preenchimento dos poros com a solução osmótica, logo no início do tratamento (FITO, 1994), uma vez que a pressão atmosférica é restabelecida, nos primeiros minutos do processo.

A pêra é uma fruta de alto valor comercial, porém cultivada em poucos países. Métodos que prolonguem a vida de prateleira de frutas são convenientes para incrementar o comércio nos países não produtores (GIRALDO et al., 2003). Existem poucos estudos com pêra enfocando a desidratação osmótica a vácuo e os diferentes aspectos entre este processamento e aquele a pressão atmosférica. Ela é uma fruta porosa e, segundo Shi et al., (1995), alimentos porosos são mais suscetíveis ao tratamento a vácuo.

Assim, determinou-se o comportamento de peras argentinas durante a desidratação osmótica a vácuo, a pulso de vácuo e a pressão atmosférica, estabelecendo-se, para isso, os perfis de umidade, de sólidos solúveis e de atividade de água. As diferenças entre os fenômenos a vácuo e a pressão atmosférica foram discutidas e foi realizada uma investigação acerca destes fenômenos de transferência.

2. – Material e Métodos

2.1 – Desidratação osmótica

2.1.1 – Preparação das amostras

Peras argentinas (variedade Buerre D'Anjou) foram usadas para todos os experimentos. As frutas eram selecionadas, procurando-se sempre o mesmo aspecto no produto fresco, a fim de assegurar o máximo de uniformidade possível entre as amostras.

Elas eram descascadas, descaroçadas, cortadas em fatias, perpendicularmente à direção ápice-base, e padronizadas segundo as dimensões: 13 mm de espessura, 58 mm de diâmetro externo e 24 mm de diâmetro interno. Quatro fatias de pêra foram usadas para cada tempo.

2.1.2 – Equipamento

O equipamento usado para os experimentos de desidratação osmótica consistiu de um dessecador a vácuo (câmara de vácuo), de uma bomba de vácuo, de uma bomba de

circulação da solução de açúcar e de um sistema de aquecimento e de resfriamento. O equipamento contava com controle da temperatura e da pressão internas. O monitoramento da temperatura era feito através do termômetro digital que dispunha de uma sonda localizada no interior do dessecador. A pressão era controlada através do vacuômetro. O equipamento era, ainda, termicamente isolado. Um dispositivo de metal mantinha as amostras uniformemente distribuídas e imersas.

2.1.3 – Tratamentos de desidratação osmótica

Solução de sacarose a 0,60 (p/p), usada em todos os experimentos, foi preparada com açúcar comercial e água destilada. Os tratamentos foram realizados a 30°C e a 40°C. As pressões sob as quais as amostras foram tratadas eram iguais à atmosférica ou a 2,7 kPa (pressão absoluta). Algumas eram integralmente tratadas sob pressão atmosférica, enquanto outras eram, da mesma forma, tratadas sob 2,7 kPa. O restante das amostras era submetido aos 2,7 kPa, durante os cinco primeiros minutos de tratamento, após os quais, a pressão atmosférica era rapidamente restabelecida, assim permanecendo até o final do tratamento. Os tratamentos a pressão atmosférica foram designados pela sigla DO (Desidratação Osmótica), os integralmente realizados sob 2,7 kPa, foram designados pela sigla DOV (Desidratação Osmótica a Vácuo) e aqueles onde houve a aplicação de vácuo durante os cinco primeiros minutos, pela sigla DOPV (Desidratação Osmótica a Pulso de Vácuo).

Os tempos de processamento foram 0, 15, 30, 45, 60, 120, 180 e 240 minutos, com triplicatas para cada tempo. A razão solução-fruta foi suficientemente grande (50:1), para evitar mudanças significativas na concentração da solução, durante os processos. A circulação da solução osmótica foi ajustada, de maneira a assegurar que a resistência à transferência de massa da fase líquida fosse desprezível.

O processamento consistiu em imergir as amostras de pêra na solução contida na câmara de vácuo e em mantê-las uniformemente submersas, com o auxílio do dispositivo metálico, durante os diferentes intervalos de tempo. No caso dos tratamentos a vácuo, a redução da pressão começava imediatamente após a imersão e o fechamento do dessecador; os tratamentos a pressão atmosférica e aqueles nos quais esta pressão, após o pulso de vácuo, era mantida até o final do tratamento, eram realizados com equipamento fechado para evitar evaporação. Após serem retiradas da solução, as quatro fatias correspondentes àquele tempo eram secas com papel absorvente e, então, analisadas. As amostras fresca, não tratadas, foram igualmente analisadas. Todos os ensaios foram feitos em triplicata.

2.1.4 – Determinações analíticas

As análises realizadas foram: umidade, conteúdo de sólidos solúveis e atividade de água. A umidade foi determinada gravimetricamente (Pregnoatto e Pregnoatto, 1985), e o conteúdo de açúcar, através do refratômetro (ABBÊ – Instruterm). A atividade de água das amostras foi verificada usando o equipamento de ponto de orvalho (Aqualab) a 25°C.

2.2 – Impregnação a vácuo: visualização com azul de metileno

O equipamento usado nos experimentos de impregnação a vácuo foi o mesmo daquele usado nos experimentos de desidratação osmótica. Entretanto, a solução, a preparação da fruta e as condições de processo foram diferentes.

2.2.1 – Preparação das amostras

Diferentes maneiras de preparo das amostras foram adotadas de acordo com as fases dos experimentos de impregnação. Inicialmente, as frutas foram apenas cortadas ao meio. Num segundo momento, foram descascadas, descaroçadas e cortadas em quatro. Por último, voltou-se a cortar as amostras ao meio, contudo, após serem descascadas e descaroçadas.

2.2.2 – Tratamento de impregnação

Solução de azul de metileno a 0,4 g/L, usada em todos os experimentos, foi preparada com reagente P.A. (Merck) e água destilada. Os tratamentos foram realizados a 20°C. As pressões sob as quais as amostras foram tratadas eram iguais à atmosférica ou a 1,3 kPa. Algumas amostras eram tratadas somente a pressão atmosférica, enquanto as outras eram integralmente tratadas a 1,3 kPa. Diferentes tempos de imersão foram adotados, de acordo com as fases dos experimentos de impregnação: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 80, 90, 180 minutos. As mesmas precauções quanto à concentração da solução, quanto à resistência e à transferência de massa foram tomadas. O processamento foi idêntico àquele realizado nos experimentos de desidratação osmótica, com exceção do pulso de vácuo, que não foi realizado nesta parte dos experimentos.

2.2.3 – Análise visual

Após serem secas, as amostras eram cortadas ao meio, expondo a maior face possível. Assim, observavam-se os pontos mais distantes da superfície, garantindo a melhor visão do fenômeno. As frutas eram, então, fotografadas com uma máquina digital evidenciando-se, sempre, as faces de corte.

3 – Resultados e Discussões

3.1 – Desidratação osmótica

Os experimentos foram realizados sob duas temperaturas durante diferentes intervalos de tempo, com quatro fatias para cada tempo em solução de sacarose. Duas pressões foram usadas de maneiras distintas nos experimentos que foram, todos, triplicados e realizados sempre com a mesma concentração do açúcar como descrito no item 2.1.3.

Nos ensaios realizados a 30°C e integralmente a 2,7 kPa, pôde-se observar um aumento na perda de água em relação aos tratamentos a p_{atm} . Entretanto, a aplicação de vácuo, durante os cinco primeiros minutos de tratamento, não teve o mesmo efeito, como ilustra a Figura 1.

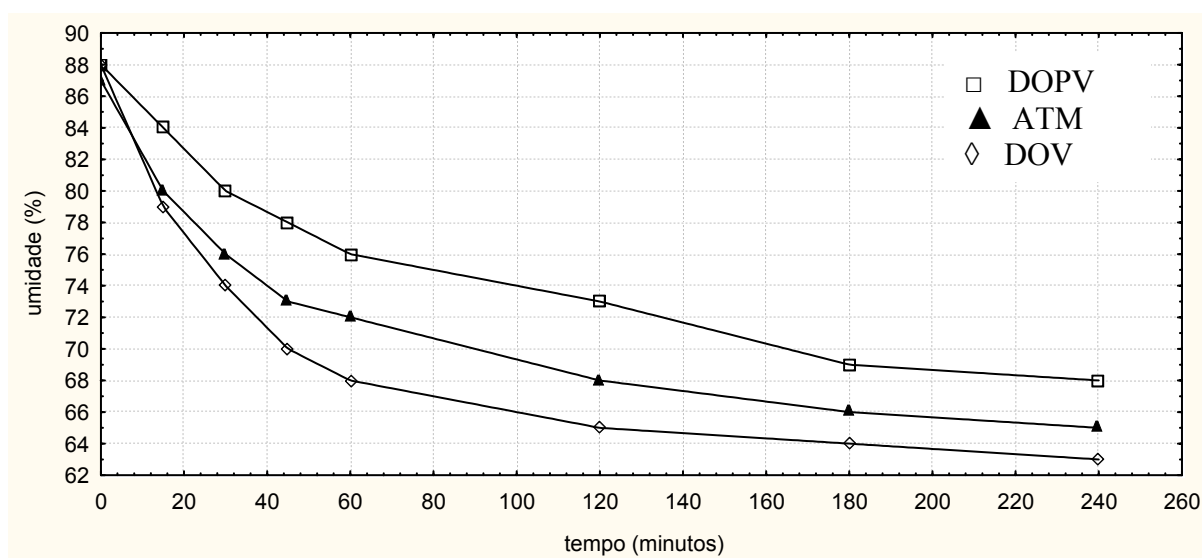


Figura 1 - Curvas de decaimento da umidade de fatias de pêra, a 30°C, sob diferentes condições de pressão, em função do tempo.

O aumento da perda de água, quando se trabalha sob vácuo, já foi observado por outros autores como Mata e Fito (1992), Pastor et al. (1992 a,b), Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994); e a sua diminuição, quando se adota as operações de DOPV, foi recentemente relatada por Fito e Chiralt (2000) e por Giraldo et al. (2003). Shi e Fito (1993) verificaram o aumento da taxa de desidratação em abacaxis, trabalhando a 30°C com solução de sacarose a 65°Brix e aplicando vácuo (DOV) pelos mesmos tempos de tratamento deste trabalho, entretanto, menos intenso (10,0 kPa). Segundo Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994), a aplicação de vácuo intensifica a perda de água por fluxo capilar, elevando, significativamente, a taxa de perda de água. Giraldo et al. (2003) trabalharam a 30°C, aplicando vácuo durante os 10 primeiros minutos de tratamento que foram realizados com diferentes concentrações de solução de sacarose. Observaram que, em todos os casos, a perda de água foi menor que aquela dos tratamentos a pressão atmosférica. Consoante

esses autores, o pulso de vácuo causa mudanças estruturais, que se refletem nas propriedades de transporte do tecido, favorecendo o ganho de açúcar e diminuindo a taxa de perda de água. De acordo com Fito e Chiralt (2000), a troca do gás pelo líquido, nos poros, promove mecanismos difusivos, nessa fração volumétrica, responsáveis por ganho de soluto, de maneira que a amostra se concentra com menores perdas de água.

A 40°C, notou-se um aumento maior na perda de água, em relação ao tratamento a pressão atmosférica, quando se trabalha sob vácuo, que aquele que ocorreu a 30°C. Verificou-se, também, uma menor diminuição da perda de água quando se trabalhou sob pulso de vácuo. O aumento das taxas de perda de água, em função da temperatura, foi constatado, em trabalhos anteriores, por Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994). A Figura 2 refere-se aos experimentos realizados a 40°C.

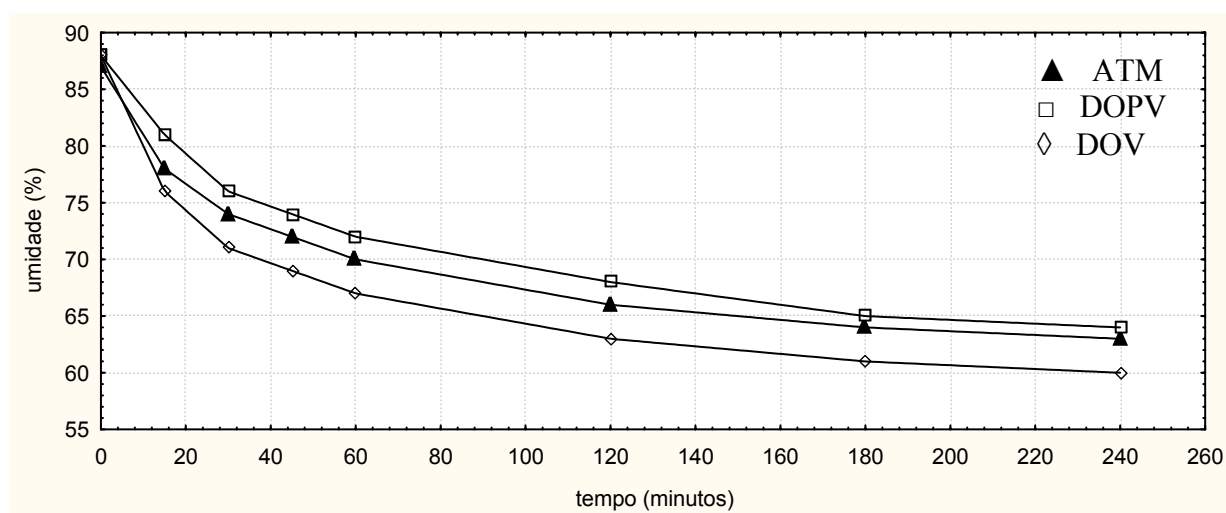


Figura 2 - Curvas de decaimento da umidade de fatias de pêra, a 40°C, sob diferentes condições de pressão, em função do tempo.

Foi observado que a aplicação de vácuo acentuou o aumento do conteúdo de sólidos solúveis com o tempo, especialmente no tratamento com pulso de vácuo, como demonstram as Figuras 3 e 4.

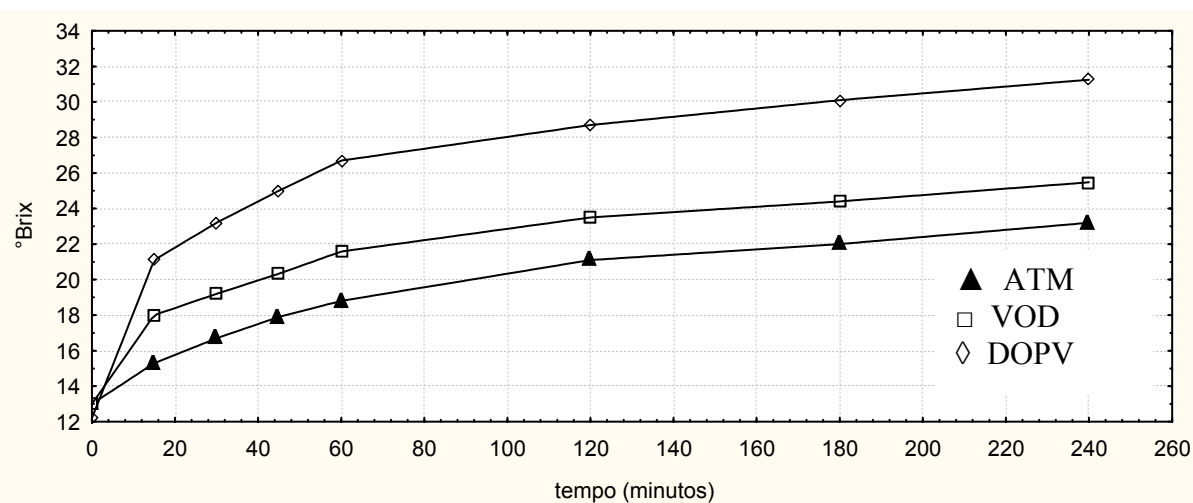


Figura 3 – Ganho de açúcar de fatias de pêra, a 30°C, sob diferentes condições de pressão em função do tempo.

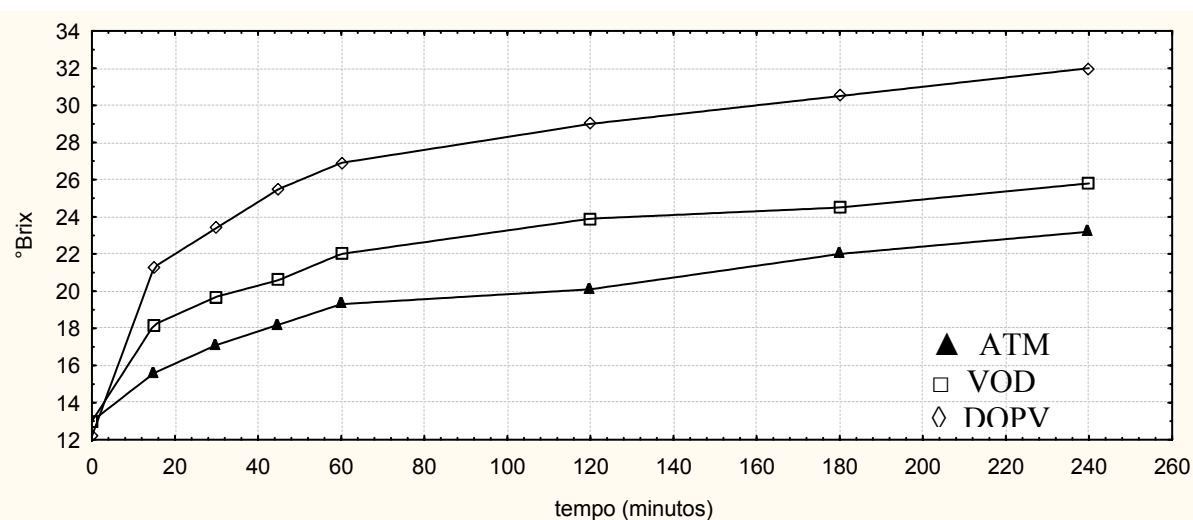


Figura 4 – Ganho de açúcar de fatias de pêra, a 40°C, sob diferentes condições de pressão em função do tempo.

O maior ganho de solutos foi recentemente verificado por Fito e Chiralt (2000) e por Giraldo et al. (2003). Neste último trabalho, vácuo foi aplicado durante os 10 primeiros minutos de tratamento, a 30°C, sob diversas concentrações de sacarose onde os autores relataram ganhos de açúcar significativos, logo após tempos muito curtos de processamento. Segundo estes, isso aconteceu devido à ação de mecanismos hidrodinâmicos, que não ocorreram significativamente a pressão atmosférica, sob as mesmas condições. Constataram, ainda, taxas de ganho de açúcar maiores, ao longo dos

processos. De acordo com os autores, a aplicação de vácuo, dessa forma, modifica as propriedades de transporte, facilitando o ganho de açúcar e diminuindo, dessa forma, a perda de água.

O aumento de temperatura pouco elevou a taxa de ganho de sacarose em relação ao tempo o que pode ser observado pela pequena diferença entre os perfis das Figuras 3 e 4. Consoante Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994), nenhuma influência significativa da temperatura pôde ser observada no ganho de açúcar. Os autores trabalharam com solução de sacarose a 65°Brix, a 30, 35, 40 e 50°C e também com os mesmos tipos de tratamento utilizados neste trabalho: DO, DOV e DOPV. A temperatura de 30°C foi utilizada somente no primeiro trabalho.

O perfil de atividade de água também foi influenciado pelas diferentes condições de pressão impostas. A aplicação de vácuo contínuo aumentou a queda da atividade de água em relação àquela da pressão atmosférica, o que está de acordo com a perda de água e com o ganho de açúcar acentuados sob essa condição. A 40°C, a queda da atividade de água é maior, para intervalos de tempo iguais.

No tratamento a pressão atmosférica, a perda de água e o ganho de soluto não foram tão grandes quanto no tratamento a vácuo, o que, provavelmente, resultou na queda menos acentuada da atividade de água. Notou-se, também, uma queda mais rápida da atividade de água a 40°C que a 30°C, sob esta pressão.

Nos tratamentos com pulso de vácuo, também foi observada uma queda da atividade de água menor, com o tempo, que aquela observada nos tratamentos a vácuo. Neste caso, entretanto, o aumento da temperatura propiciou uma mudança na posição relativa da curva do tratamento com pulso de vácuo. A 40°C, a atividade de água cai mais rapidamente sob DOPV que sob pressão atmosférica, enquanto que a 30°C, ocorreu o contrário. Notou-se, também, uma queda mais rápida da atividade de água a 40°C que a 30°C, sob este tratamento. As Figuras 5 e 6 referem-se aos perfis de atividade de água obtidos nos experimentos realizados a 30 e 40°C.

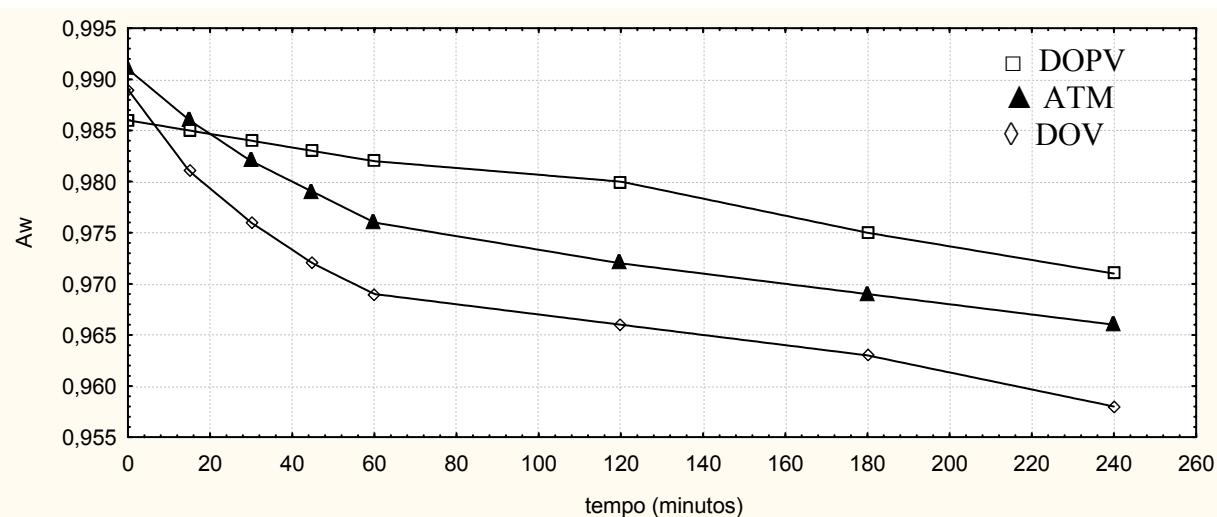


Figura 5 – Curvas de atividade de água em função do tempo para tratamentos realizados a 30°C sob diferentes condições de pressão com fatias de pêra.

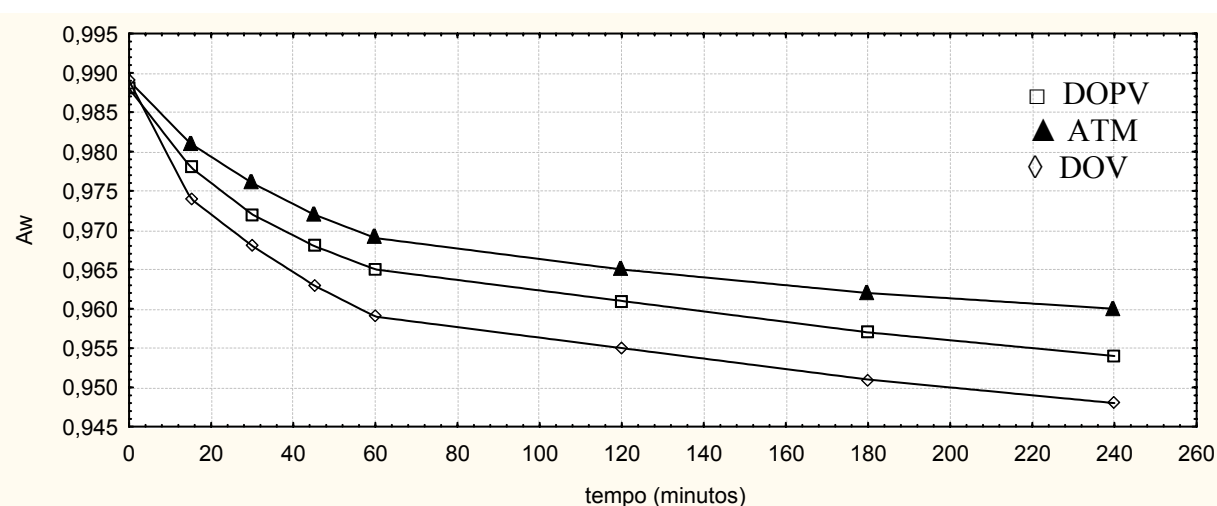


Figura 6 – Curvas de atividade de água em função do tempo para tratamentos realizados a 40°C sob diferentes condições de pressão com fatias de pêra.

A aplicação de vácuo e a temperatura de trabalho, durante os tratamentos de desidratação osmótica, influenciaram o comportamento das frutas estudadas. Segundo os resultados obtidos, pôde-se notar que as variáveis de processo poderiam ser combinadas para a obtenção de produtos com diferentes características. Observou-se, ainda, que a redução do tempo de tratamento e da temperatura, sem redução da perda de água, seria possível, até certo ponto, pela aplicação de vácuo contínuo.

3.2 - Impregnação a vácuo: visualização com azul de metileno

Os experimentos de impregnação foram realizados em diferentes etapas que se caracterizam pelo preparo da fruta e por tempos de tratamento específicos. Os ensaios, em todas as etapas, eram integralmente realizados, ou a pressão atmosférica, ou a 1,3 kPa

(pressão absoluta); e sempre com solução de azul de metileno a 0,4 g/L a 20°C. Após o tratamento, as amostras foram cortadas ao meio e fotografadas. Através da observação da face desse corte, pôde-se observar a penetração de azul de metileno no interior da fruta. A aplicação de vácuo influenciou decisivamente as respostas aos tratamentos de impregnação, como mostram as seqüências das Figuras 7, 8 e 9. O modo de preparo da fruta também influenciou as respostas a impregnação.

Nos ensaios onde as peras foram somente cortadas ao meio, antes de serem imersas na solução corante, realizados a pressão atmosférica, não se verificou penetração de azul de metileno no interior das frutas, em nenhum tempo de tratamento (35, 55, 75, e 180 minutos); nem mesmo nas amostras tratadas durante 3 horas, que foi o tempo máximo de tratamento, como pode ser observado na Figura 7(a).

Nos experimentos com esse tipo de corte, realizados sob vácuo, durante 10, 25, 40 e 60 minutos, pôde-se observar uma pequena penetração do corante, especialmente junto à superfície sem casca, em contato com a solução. Aos dez minutos iniciais de tratamento, já se observaram a presença do corante junto a esta superfície e, também, a mudança de coloração do interior da fruta, como pode ser visualizado na Figura 7(b).

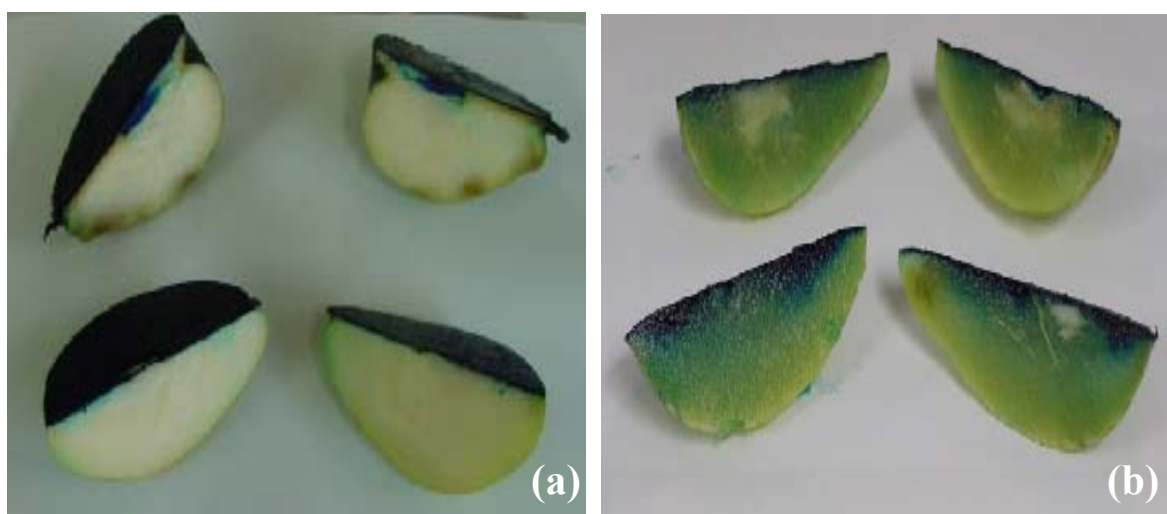


Figura 7 – Peras cortadas ao meio antes do tratamento: (a) pressão atmosférica – 3 horas e (b) vácuo – 10 minutos.

Os ensaios utilizando pêra e solução colorida com azul de metileno mostraram a influência do vácuo e forneceram subsídios para uma melhor compreensão dos fenômenos de transporte que ocorrem durante a desidratação osmótica a vácuo.

Considerando esses resultados, foi realizada uma nova série de experimentos, com peras descascadas, descaroçadas e cortadas em quatro partes iguais, ao invés de somente ao

meio, facilitando, desta maneira, o transporte de massa. As condições experimentais foram as mesmas que as dos experimentos anteriores (20°C, pressão atmosférica ou 1,3 kPa, 0,4g/L de azul de metileno). Observou-se um aumento na impregnação das amostras tratadas a vácuo. Todavia, nenhuma diferença foi notada nas amostras tratadas a pressão atmosférica. Nem o tratamento mais longo (90 minutos) sob pressão atmosférica, foi capaz de levar a uma impregnação significativa, como mostra a Figura 8(a). Contudo, já aos 5 minutos de tratamento, sob 1,3 kPa, verificou-se intensa coloração das frutas, conforme ilustra a Figura 8(b).

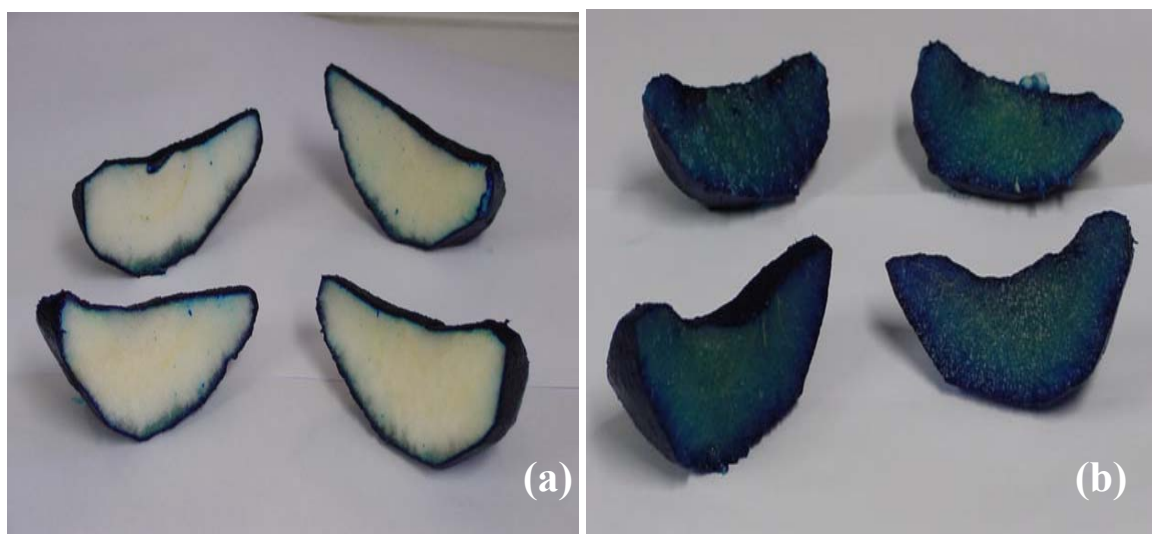


Figura 8 – Peras descascadas, descaroçadas e cortadas em quartos antes do tratamento: (a) pressão atmosférica - 90 minutos; (b) 1,3 kPa - 5 minutos.

Devido à expressiva entrada de azul de metileno na fruta, mais uma série de experimentos foi realizada, com as mesmas condições de tratamento, agora somente a vácuo (1,3 kPa, 20°C, 0,4g/L azul de metileno). Voltou-se a cortar as peras ao meio, porém descascando-as e descaroçando-as, a fim de verificar se a aplicação de vácuo também seria eficaz, como no caso anterior, para amostras maiores. Observou-se, assim, a presença de azul de metileno nas peras cortadas ao meio da mesma forma que se observou nas peras cortadas em quartos. Já aos 5 minutos, também foi possível notar coloração das frutas como mostra a Figura 9.

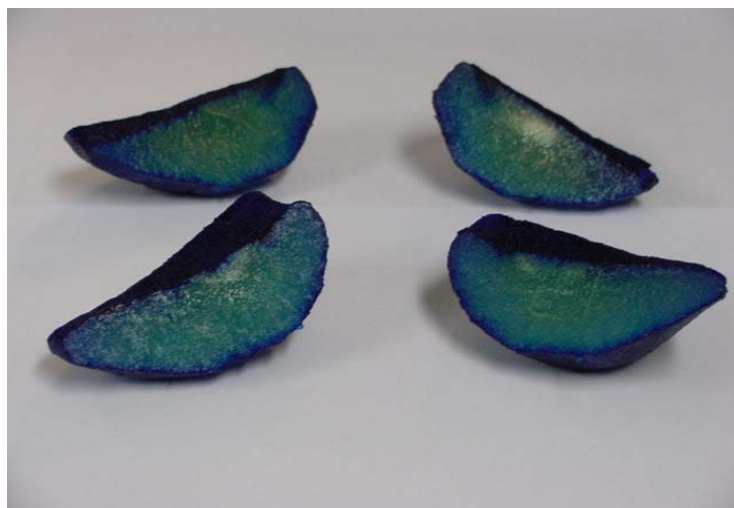


Figura 9 – Peras descascadas, descaroçadas e cortadas ao meio antes do tratamento. Ensaio a 1,3 kPa x por 5 minutos.

Assim, pôde-se constatar que a aplicação de vácuo foi decisiva, sempre contribuindo para uma maior impregnação, em relação aos tratamentos a pressão atmosférica.

A maior diferença entre os tratamentos pôde ser visualizada todas as vezes que as amostras foram preparadas sem casca e sem talo que, então, revelaram-se como bloqueadores do mecanismo hidrodinâmico (HDM). Segundo a teoria proposta por Fito e Pastor (1994), a impregnação de solução requer um estágio anterior de saída de gás do interior da estrutura porosa. Supõe-se que, de alguma forma, a casca e o talo não permitiram a saída do gás (ou permitiram muito pouco) o que dificultou a penetração da solução corante na matriz porosa.

Nos tratamentos a vácuo em que se usou frutas preparadas sem casca e sem talo, sempre se observou a coloração, o que foi um indício de que a rede de poros da pêra é interligada e se estende por grande parte da fruta. Hofmeister (2003) observou a conectividade entre os poros de maçãs descascadas e cortadas ao meio, que também foram intensamente coloridas, após 12 minutos aplicando-se, de maneira intermitente, uma pressão absoluta igual a 13,3 kPa também usando solução de azul de metileno a 0,4 g/L. Já em abacaxis, a pesquisadora observou que a impregnação se restringiu somente às proximidades da superfície, mesmo depois de aplicação, o que sugeriu que os poros do abacaxi não eram interligados.

A intensa coloração das amostras aqui estudadas está de acordo com o mecanismo hidrodinâmico proposto por Fito e Pastor (1994). De acordo com os autores, ao se reduzir a pressão, propicia-se uma impregnação de solução nos poros dos alimentos, quando a

pressão atmosférica é restabelecida.. O percentual dos poros ocupados, representados por x_v , é dado pela razão entre: a diferença entre a pressão externa e a interna, antes da impregnação, e a pressão externa, como mostra a expressão 1:

$$x_v = \frac{P_e - P_{io}}{P_e} \quad (1)$$

Para as condições adotadas neste trabalho e desprezando-se a pressão capilar, assim como Fito (1994) assume um valor igual a 0,9868. Isto significa que 98,68 % do volume dos poros foi ocupado pela solução corante. Desta maneira, pode-se compreender melhor os resultados dos experimentos. A aplicação de vácuo aumenta, consideravelmente, a penetração das soluções nos poros do alimento, o que explica a presença do corante, no interior das frutas tratadas a vácuo. Isto faz supor que estes fenômenos também tenham sido responsáveis pelas cinéticas de desidratação mais rápidas dos experimentos relatados em 2.1. A maior penetração da solução nos poros faz com que os fenômenos difusivo e osmótico tenham uma superfície interfacial maior.

Considerando que os fenômenos de transferência a vácuo se diferenciaram, significativamente, daqueles a pressão atmosférica e que houve uma concordância qualitativa com o fenômeno descrito pela teoria, sugere-se um estudo mais aprofundado para verificar se o modelo proposto, de fato, explica a impregnação de soluções na pêra argentina.

A diferença quanto as respostas obtidas nos tratamentos a vácuo, para perda de água, isto é, aumento da perda de água por vácuo contínuo e, diminuição por pulso de vácuo pode ter ocorrido também pela diferença quanto ao fluxo capilar de perda de água que, nos tratamentos com pulso de vácuo, durou apenas 5 minutos. O fluxo capilar de perda de água foi descrito e modelado por Shi e Fito (1993) e Shi e Fito (1994) e, segundo os autores, é criado pelo vácuo e é responsável pelo aumento da perda de água que ocorre sob essas condições. Ainda salientaram que sob pressão atmosférica, o fluxo capilar de perda de água é desprezível. Além disso, o rápido fluxo de entrada de solução no interior das amostras pode ter aumentado momentaneamente a umidade já que grandes quantidades de solução penetram no interior das frutas logo nos primeiros minutos de processo.

O maior ganho de açúcar causado pela aplicação de vácuo está de acordo com os fluxos rápidos de ganho de solução, em tempos de processamento muito curtos, promovidos pelo HDM, quando a pressão atmosférica é restabelecida. O menor aumento do conteúdo de sólidos solúveis no tratamento integralmente realizado a vácuo pode ter ocorrido, em função de mudanças estruturais. Segundo Giraldo et al. (2003), o aumento da

rigidez das camadas celulares externas ocorre rapidamente, em soluções concentradas, limitando a entrada de solução. Isse e Schuber (1991) ainda relataram que, após 60 minutos de tratamento com solução concentrada de sacarose, ocorre uma redução apreciável no número de poros na superfície, causando enrijecimento e diminuindo a taxa de processo. Esses efeitos teriam, então, limitado a entrada de solução, ao final do tratamento, quando a pressão atmosférica era restabelecida, o que se poderia explicar o menor ganho de açúcar.

A maior queda da atividade de água, em relação a pressão atmosférica, causada pela aplicação de vácuo durante todo o tempo de imersão concordou com o fato da perda de água ter sido intensificada nestes tratamentos. O comportamento desencadeado pela aplicação de vácuo na forma de pulso pode ter ocorrido em função da diminuição da diferença entre as perdas de água a pressão atmosférica e a pulso de vácuo, a 30 e 40°C. A maior perda de água talvez tenha sido suficiente para que a atividade de água caísse mais rapidamente a pulso de vácuo que a pressão atmosférica, a 40°C.

A pouca impregnação com azul de metileno nas amostras apenas cortadas ao meio foi atribuída à casca e ao talo não removidos, já que em experimentos onde essas estruturas foram retiradas, notou-se uma intensa colorização das amostras. É possível que ambas as estruturas tenham impedido a saída do ar, durante a etapa de vácuo, não permitindo, assim, grandes impregnações no ato do restabelecimento da pressão atmosférica. Percebeu-se, ainda, que partes remanescentes do tecido que envolve caracteristicamente a haste da fruta, isto é, partes do talo da fruta, que não conseguiram ser removidas em algumas amostras, sofreram impregnações significativamente menores o que sugere que esta parte da fruta seja, de fato, uma bloqueadora do transporte de matéria.

4 – Conclusão

A aplicação de vácuo nos processos de desidratação osmótica afetaram os fenômenos de transferência de massa de diferentes maneiras dependendo da forma de aplicação e também da temperatura.

Vácuo contínuo mostrou-se capaz de aumentar a perda de água enquanto que a forma de pulso diminuiu esta perda. Ambas as formas de aplicação possibilitaram incrementos nos ganhos de açúcar, em relação a pressão atmosférica. Pressões reduzidas ao longo de todo o tempo de tratamento aumentaram a queda da atividade de água, comparada a pressão atmosférica, enquanto que o pulso de vácuo possibilitou este aumento somente a 40°C.

Pressões subatmosféricas exercidas nos tratamentos sólido-líquido implicaram, mesmo atuando por curtos intervalos de tempo, em grandes penetrações de corante no interior das frutas que foram assim intensamente colorizadas.

Desta forma, os processos a vácuo mostraram-se capazes de melhorar a qualidade dos produtos de frutas, potencializando as trocas de matéria que ocorreram durante processos de desidratação osmótica e impregnação. Assim, a aplicação de vácuo revelou-se como uma nova tecnologia útil para o desenvolvimento de novos produtos e processos.

A variabilidade quanto às respostas às operações de desidratação em função das variáveis de processo sugere que a combinação destas pode ser feita de forma a se obter diferentes perfis de transporte de massa criando, assim, um recurso tecnológico.

Referências Bibliográficas

- BARAT, J. M.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Modeling of Simultaneous Mass Transfer and Structural Changes in Fruit Tissues.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 77-85, 2001.
- FITO, P. **Modeling of Vacuum Osmotic Dehydration of Food.** Journal of Food Engineering, v.22, p.313-328, 1994.
- FITO, P. & CHIRALT, A. **Vacuum impregnation of plant tissues.** In: S. M. Alzamora, M.S. TAPIA. & A. LÓPEZ-MALO (Eds). Design of minimal processing technologies for fruit and vegetables. Maryland: Aspen Publishers Inc. p. 189-205, 2000.
- FITO, P.; CHIRALT, A.; BARAT, J.M.; ANDRÉS, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J. & MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. **Vacuum Impregnation for Development of New Dehydrated Products.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 297-302, 2001.
- FITO, P.; CHIRALT, A.; BETORET, N.; GRAS, M.; CHÁFER, M.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; ANDRÉS, A. & VIDAL, D. **Vacuum Impregnation and Osmotic Dehydration in Matrix Engineering. Application in Functional Fresh Food Development.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 175-183, 2001.
- GIRALDO, G.; TALENS, P.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Influence of Sucrose Solution Concentration on Kinetics and Yield During Dehydration of Mango.** Journal of Food Engineering, v. 58, p. 33-43, 2003.
- HOFMEISTER, L.C. **Estudo da impregnação a vácuo em alimentos porosos.** Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- ISSE, M.G. & SCHUBER, H. **Osmotic dehydration of mango. Mass transfer between mango and syrup.** In: D. Behrens (Ed). Proceedings of the fourth world congress of chemical engineering. Karlsruhe. p 738-745, 1991.

- MATA, M. & FITO, P. **Vacuum osmotic dehydration of foods (VOD) I: Design and evaluation of a pilot plant.** In *ISOPOW-V*, Valencia, Spain, p. 260, 1992.
- PASTOR, R. MATA, M., FITO, P. **Deshidratacion Osmótica de manzana.** *Anales de Investigacion del Master em Ciencia e Ingenieria de Alimentos*. Vol. 1. SPUPV. Valencia, Spain. p 857-874, 1992a.
- PASTOR, R. MATA, M., FITO, P. **Vacuum osmotic dehydration of foods (VOD) II. Introduction to modelization of transfer phenomena in apple (*Granny Smith*) drying.** In *ISOPOW-V*. Valencia, Spain, 1992b.
- PREGNOLATTO, W. & PREGNOLATTO, N. P. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz – Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos.** Instituto Adolfo Lutz, 3^a ed, São Paulo (Brasil), 1985.
- ROSA, M. D. & GIROUX, F. **Osmotic Treatments (OT) and Problems Related to Solution Managment.** *Journal of Food Engineering*, v.49. p. 223-236, 2001.
- SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Osmotic Dehydration Progression in Apple Tissue I: Spatial Distribution of Solutes and Moisture Content.** *Journal of Food Engineering*, v. 42, p.125-132, 1994
- SHI, X. Q. & FITO, P. **Vacuum Osmotic Dehydration of Fruits.** *Drying Technology*, v.11, n.6, 1429-1442, 1993.
- SHI, X. Q. & FITO, P. **Mass Transfer in Vaccum Osmotic Dehydration of Fruits. A Mathematical Model Approach.** *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie*, v. 27, p.67-72, 1994.
- SHI, X. Q. & FITO, P. & CHIRALT, A. **Influence of Vacuum Treatment on Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits.** *Food Research International*, v. 28, n.5, p.445-454, 1995.

ARTIGO II
IMPREGNAÇÃO A VÁCUO DE FRUTAS

IMPREGNAÇÃO A VÁCUO DE FRUTAS

Bernardo Alberto Marcussi, José Antonio Ribeiro Souza *

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, C.P. 476, 88040-900 – Florianópolis, Brasil.

* jantonio@enq.ufsc.br

RESUMO

A aplicação de vácuo em operações onde alimentos são imersos em soluções leva a um comportamento particular dos fenômenos de transferência de massa. Um fluxo hidrodinâmico de solução ocorre para o interior do alimento em função dos gradientes de pressão impostos, caracterizando o fenômeno de impregnação a vácuo. Nesta pesquisa, esse fenômeno foi estudado estabelecendo-se a dependência entre a fração do alimento impregnada e a fração de seus poros impregnada, que foi calculada de acordo com o modelo hidrodinâmico. Desta maneira, procurou-se determinar se o modelo hidrodinâmico explicaria esse fenômeno em peras argentinas e também se a porosidade obtida através deste modelo ε_e corresponderia a porosidade da fruta além de verificar se os meios de imersão adotados influenciariam sobre esse valor e sobre o comportamento da fruta. Para tanto se determinou o comportamento da fruta tratando-a sob diferentes pressões (4,0; 8,0; 21,3; 34,7 e 48,0 kPa) durante 5 minutos em solução isotônica de sacarose e em suco da fruta, a 30°C. Obteve-se, assim, a porosidade efetiva através do modelo. Determinou-se a porosidade das amostras, usando-se picnometria e, então, comparou-se ambas. O modelo hidrodinâmico explicou satisfatoriamente o fenômeno de impregnação a vácuo em peras argentinas. A porosidade efetiva da fruta foi próxima àquela determinada usando picnometria e praticamente igual ao coeficiente angular da reta obtida nos experimentos realizados com suco, revelando que o modelo hidrodinâmico, além de poder ser usado para o cálculo dos volumes de solução transferidos, prevê, com boa precisão, a porosidade efetiva.

1. Introdução

A aplicação de vácuo em operações onde alimentos sólidos porosos são imersos em soluções foi inicialmente relatada em processos de desidratação osmótica. Todavia, as diferenças fenomenológicas entre os processos a vácuo e a pressão atmosférica que vêm sendo relatadas, em diversos trabalhos, têm sugerido uma gama de novas funções tecnológicas para as operações sólido-líquido. Um fluxo de entrada do líquido externo na matriz porosa, que ocorre durante o restabelecimento da pressão atmosférica, tornando possível a incorporação de quaisquer ingredientes (FITO et al., 2001), ficou conhecido como impregnação a vácuo. Desta forma, consoante estes autores, ácidos, conservantes, nutrientes especiais, antioxidantes, vitaminas, cátions e açúcares podem ser adicionados

aos alimentos sólidos porosos. Assim, a impregnação a vácuo pode ser considerada como uma ferramenta no desenvolvimento de produtos de frutas, uma vez que modifica, convenientemente, suas composições originais (CHIRALT et al., 1999). Ela tem sido aplicada a frutas minimamente processadas (TAPIA DE DAZA et al., 1996; TAPIA DE DAZA et al., 1999), a produtos de umidade intermediária (TAPIA DE DAZA et al., 1996) e em processos crioprotetores (FITO et al., 1996; MARTÍNEZ-MÓNZO et al., 1998).

Fito e Pastor (1994) propuseram um modelo impregnação a vácuo, a fim de descrever trocas de matéria que ocorrem nos processos onde há aplicação de vácuo; esse modelo ficou conhecido como o mecanismo hidrodinâmico ou, simplesmente, o HDM. Conforme Cháfer et al. (2003), a operação de impregnação a vácuo (IV) consiste na imersão de um produto poroso em uma solução, aplicando pressão subatmosférica, por um curto intervalo de tempo, de maneira a promover o fluxo de saída do gás interno e, então, no restabelecimento da pressão atmosférica durante o qual ocorre o fluxo hidrodinâmico de entrada da solução externa nos poros. Fito e Pastor (1994) e Fito (1994) verificaram, experimentalmente, o mecanismo hidrodinâmico em diversas frutas. Fito (1994) concluiu que as equações propostas pela teoria do mecanismo hidrodinâmico (HDM) permitiram o cálculo dos volumes de líquido transferido, através deste mecanismo, e explicaram as influências da pressão e das características microestruturais dos alimentos. Desta maneira, tornou-se possível compreender melhor os fenômenos de transferência de massa que ocorrem nas operações de impregnação de alimentos porosos com líquidos, a vácuo. Ainda, consoante Mújica-Paz et al. (2003), o volume máximo teórico possível de ser impregnado pode ser calculado a partir da porosidade efetiva. Fito e Pastor (1994) ressaltaram a necessidade de se realizar estudos com outros alimentos, a fim de se avaliarem seus comportamentos, quando submetidos ao HDM, e, especialmente, de se tornarem conhecidos os valores de porosidade efetiva. Mújica-Paz et al. (2003) enfatizaram que o conhecimento do comportamento de impregnação dos alimentos sob diversas condições de impregnação a vácuo é essencial para o desenvolvimento de alguns processos de conservação.

O volume de líquido impregnado foi modelado também em função de deformações na matriz sólida (FITO et al., 1996). Entretanto, deformações nas amostras são vistas como negligenciáveis para um grande número de frutas (SALVATORI et al., 1998; CHIRALT et al., 1999).

A viscosidade afetou bastante a resposta ao processo de impregnação a vácuo, segundo Barat et al. (2001a) e Cháfer et al. (2001a). A microestrutura do alimento, a

porosidade, o tamanho, a distribuição e a comunicação dos poros afetam a cinética do mecanismo hidrodinâmico (ANDRÉS et al., 1995). Frutas com alta porosidade são suscetíveis ao tratamento a vácuo, consoante Shi et al.(1995).

Assim, face à necessidade de se conhecer o comportamento dos alimentos, quando submetidos a vácuo nas operações sólido-líquido, e, também, suas porosidades efetivas, uma série de experimentos foi realizada, objetivando verificar se o modelo hidrodinâmico proposto por Fito e Pastor (1994) explica, satisfatoriamente, o comportamento de impregnação em peras argentinas. A determinação da porosidade das amostras também foi feita.

1.1 - Mecanismo Hidrodinâmico - HDM

Inicialmente proposto por Fito e Pastor, em 1994, o mecanismo hidrodinâmico estabelece uma relação simples entre pressões utilizadas no seu processo e o percentual de impregnação dos alimentos. A descrição desse mecanismo é dada pelo desenvolvimento, a seguir, e é acompanhada por ilustrações que auxiliam a sua compreensão.

A Figura 1 mostra um espaço intercelular ou poro que pertence a um alimento sólido poroso e que foi idealizado como um cilindro de diâmetro D e comprimento z , constantes, preenchido por ar. O sólido encontra-se submerso em meio líquido, de maneira que a pressão interior do gás será p_i , e a pressão exterior, p_e . A última pressão será igual à pressão do sistema, p_2 , acrescida da pressão capilar, p_c , podendo esta última ser calculada mediante a equação de Young-Laplace:

$$P_c = \frac{8\sigma}{D^2} \quad (1)$$

onde σ , é a tensão superficial do líquido.

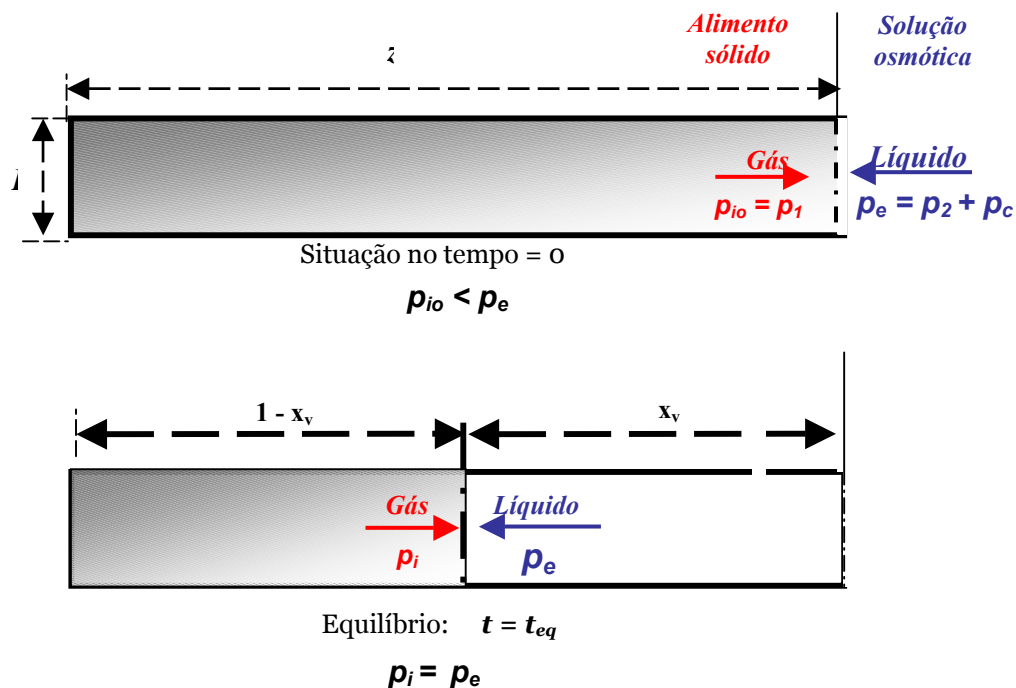


Figura 1 – Esquema de atuação do HDM, em um poro (FITO & PASTOR, 1994).

Numa abordagem simplificada, a penetração do líquido em um poro ocorre devido aos gradientes de pressão, que podem ser calculados pela equação de Poisselle:

$$-\Delta p + \frac{32\mu z^2}{D^2} x_v \frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (2)$$

onde μ é a viscosidade do líquido e x_v é a fração do volume do poro impregnada pela solução. O gradiente de pressão ou força impulsora diminui decorrente do aumento de p_i à medida que o gás é comprimido. Assumindo uma compressão isotérmica de um gás ideal, tem-se a seguinte equação:

$$-\Delta p = p_e - \frac{p_{io}}{(1-x_v)} \quad (3)$$

Onde p_{io} é o valor inicial da pressão do gás.

Das equações (2) e (3), tem-se:

$$p_e - \frac{p_{io}}{(1-x_v)} + \frac{32\mu z^2}{D^2} x_v \frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (4)$$

A condição de equilíbrio será atingida quando as pressões p_e e p_i se tornarem iguais. Neste instante, o menisco se estabiliza e tem-se:

$$\frac{dx_v}{dt} = 0 \quad (5)$$

Das equações (4) e (5), o valor de x_v pode ser expresso como:

$$x_v = \frac{(p_e - p_{io})}{p_e} \quad (6)$$

Considerando que

$$p_e = p_2 + p_c \quad (7)$$

e

$$p_{io} = p_1 \quad (8)$$

e substituindo (7) e (8) em (6), pode-se expressar x_v como:

$$x_v = \frac{(p_2 + p_c - p_1)}{(p_2 + p_c)} \quad (9)$$

Quando gradientes de pressão não são impostos ao sistema, $p_1 = p_2$, e a única força motriz é a pressão capilar, p_c . Neste caso:

$$x_v = \frac{p_c}{(p_2 + p_c)} \quad (10)$$

A equação (9) pode ser escrita de forma mais simplificada, ou seja:

$$x_v = 1 - \frac{1}{r} \quad (11)$$

Onde r é a relação de compressão real, dada por:

$$r = \frac{(p_2 + p_c)}{p_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right) + \left(\frac{p_c}{p_1} \right) \quad (12)$$

onde $R = \frac{p_2}{p_1}$ e $p_r = \frac{p_c}{p_1}$ podem ser definidas como a relação de compressão aparente e a de pressão capilar reduzida, respectivamente, e deste modo:

$$r = R + p_r \quad (13)$$

Em muitos casos, p_r é muito menor que R , então se pode assumir que $r = R$.

Considerando que o fenômeno descrito acontece igualmente em todos os poros, ou seja, que a fração do volume dos poros de um alimento impregnada é igual à fração do volume de qualquer poro impregnada (x_v), pode-se determinar a fração do volume do alimento impregnada. Para tanto, basta multiplicar-se x_v pela porosidade efetiva. O significado físico desta operação é a multiplicação da fração do volume dos poros de um alimento impregnada pela fração do volume da fruta que correspondem aos poros o que é a fração do volume do alimento impregnada pela solução, como pode ser visto pela expressão 14.

$$x = \varepsilon_e x_v \quad (14)$$

Na Figura 2, visualizam-se os valores de x_v encontrados segundo a equação (11), em função de R e p_r . A curva correspondente a $R = 1$ descreve somente o efeito da capilaridade, quando o sistema não é submetido a gradientes de pressão. Verifica-se que os valores de x_v diminuem à medida que p_r diminui. Entretanto, quando p_r aumenta por exemplo, quando se trabalha com baixas pressões, o valor de x_v aumenta, significativamente. Este aumento é muito expressivo, quando se impõe um gradiente externo de pressão ($R > 1$), como pode ser observado na Figura 2.

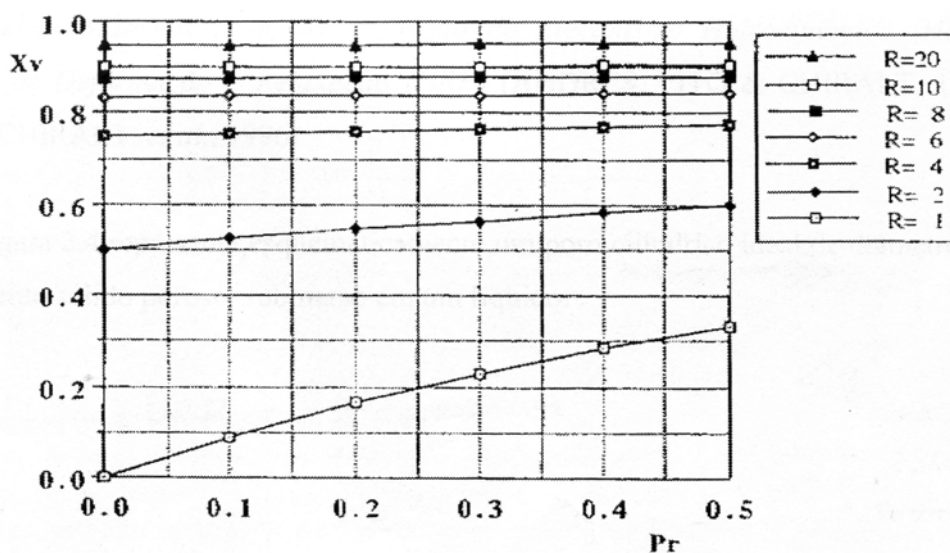


Figura 2 – Valores de x_v segundo a equação (11), para diferentes valores de p_r e R (FITO & PASTOR, 1994).

Como pôde ser visto na Figura 2, para valores grandes de R , a pressão capilar reduzida pouco influi sobre os valores de x_v o que significa, em última instância, que a pressão capilar pouco contribui para esses valores e, portanto, pode ser desprezada.

Ocorre uma grande transferência hidrodinâmica de solução para o interior das amostras quando a pressão atmosférica é restabelecida nos processos a vácuo, o que se encontra evidenciado nas curvas da Figura 2. Os fenômenos difusivo e osmótico são intensificados, neste momento, devido à impregnação a vácuo causar um aumento da superfície de transferência, ao promover o contato da solução externa com as superfícies internas dos poros do alimento.

1.2 – Abordagem teórica: porosidade

A porosidade efetiva (ε_{et}) é definida como a razão entre o volume dos poros do alimento, em qualquer momento, e o volume inicial do alimento, como mostrado pela equação (15):

$$\varepsilon_{e_t} = \frac{V_p}{V_{0f}} = \frac{V_p}{(V_{op} + V_{oms})} \quad (15)$$

onde, v_p é o volume de poros do alimento em qualquer instante, V_{of} é o volume inicial da fruta, V_{op} é o volume inicial de poros da fruta e V_{oms} é o volume inicial da matriz sólida. A relação entre o volume de gás presente na amostra e seu volume, antes de qualquer interação sólido-líquido, é de vital importância nos processos de modelagem e foi definida por Fito et al. (1996) como mostra a equação (16):

$$\varepsilon_e = \frac{V_{go}}{V_o} \quad (16)$$

onde, V_{go} é o volume de gás presente na amostra antes de qualquer interação sólido-líquido e V_o é o volume inicial da amostra. O volume de poros é igual ao volume de gás, antes deste tipo de interação (Fito & Pastor, 1994; Fito, 1994; Fito et al., 1996).

A porosidade das amostras tem sido calculada por muitos autores (Giraldo et al., 2003; Cháfer et al., 2003; Mújica-Paz et al., 2003) aplicando-se a equação (22) que relaciona o volume de poros em qualquer instante com o respectivo volume do alimento. Esta pressão pode ser reescrita da forma mostrada pela equação 17:

$$\varepsilon = \frac{\frac{YM_1}{V_2} - \frac{M_1 + M_G}{V_2}}{\frac{YM_1}{V_2}} \quad (17)$$

onde, M_1 é a massa da matriz sólida desgaseificada, M_g é a massa de gás originalmente presente na amostra, V_2 é o volume da amostra e Y é um parâmetro numérico adimensional. A equação (17) simplificada, torna-se a equação (18):

$$\varepsilon = \frac{(YM_1 - (M_1 + M_g))}{YM_1} \quad (18)$$

que determina a mesma relação da equação (16) quando é aplicada às amostras antes de qualquer interação sólido-líquido, como pode ser visto através da igualdade (19):

$$\frac{(YM_1 - (M_1 + M_g))}{YM_1} = \frac{V_{go}}{V_o} \quad (19)$$

quando não ocorrem deformações, o volume dos poros do alimento e o volume do alimento não variam, ou seja, a equação (15) é constante. Desta maneira, a equação (18) aplicada em qualquer momento das operações sólido-líquido representa o mesmo valor que aquele dado pela expressão (15) o que pode ser visto através da equação (20):

$$\frac{(YM_1 - (M_1 + M_g))}{YM_1} = \frac{V_p}{V_{of}} \quad (20)$$

2. Material e métodos

2.1 – Preparação das amostras

Peras argentinas (variedade Buerre D'Anjou), foram usadas para todos os experimentos. As frutas eram selecionadas procurando-se sempre um mesmo aspecto no produto fresco, a fim de assegurar o máximo de uniformidade possível entre as amostras.

Elas eram descascadas, descaroçadas, cortadas em fatias perpendicularmente à direção ápice-base e padronizadas. Quatro fatias de pêra foram usadas para cada tempo.

2.2 – Equipamento

O equipamento usado para os experimentos de impregnação a vácuo consistiu de um dessecador a vácuo (câmara de vácuo), de uma bomba de vácuo, de uma bomba de circulação de fase líquida e de um sistema de aquecimento e de resfriamento. O equipamento contava com controle da temperatura e da pressão internas. O monitoramento da temperatura era feito através do termômetro digital que dispunha de uma sonda localizada no interior do dessecador. A pressão era controlada através do vacuômetro. O

equipamento era, ainda, termicamente isolado. Um dispositivo de metal mantinha as amostras uniformemente distribuídas e imersas.

2.3 – Ensaios de impregnação a vácuo

Soluções isotônicas de sacarose foram preparadas mediante dissolução de açúcar comercial em água destilada, até que a mesma atividade de água das amostras fosse atingida. Segundo Fito e Pastor (1994), soluções isotônicas evitam outros mecanismos de transferência de massa que não sejam o HDM. O suco de pêra, também usado como fase líquida, foi preparado a partir de frutas descascadas, descaroçadas e trituradas. O material fibroso foi removido por filtração a vácuo. As pressões de trabalho usadas nesta pesquisa foram 4,0; 8,0; 21,3; 34,7 e 48,0 kPa que é uma faixa mais baixa que as usadas por Fito e Pastor (1994) e por Fito (1994). Todos os tratamentos foram conduzidos a 30°C e, assim como Fito e Pastor (1994) e Fito (1994), durante 5 minutos.

A razão entre o volume de solução e o de fruta foi maior que 50:1 e a circulação de solução foi ajustada, de maneira a assegurar a ausência de gradientes de temperatura.

As fatias de pêra eram pesadas, rotuladas e tinham suas dimensões medidas. O processamento consistiu em imergir as amostras de pêra na fase líquida contida na câmara de vácuo e, em mantê-las uniformemente submersas, com o auxílio do dispositivo metálico, por 5 minutos, sob uma das pressões. A pressão atmosférica era, então, restabelecida, as amostras retiradas da fase líquida, secas com papel absorvente para retirar o excesso de líquido e repesadas, como descrito por Fito e Pastor (1994). A densidade da fase líquida era determinada e o cálculo das frações das amostras impregnadas (x das amostras) era feito como descrito por Salvatori (1997), através da equação 21:

$$x = \frac{M_f - M_o}{\rho V_o} \quad (21)$$

onde M_f é a massa de uma amostra, após o tratamento; M_o é a massa, antes do tratamento; V_o é o volume da amostra que era medido, antes do tratamento e ρ , a densidade da fase líquida.

x_v era calculado desprezando-se a pressão capilar, como apresentado anteriormente por FITO (1994). Quatro fatias de pêra foram usadas por intervalo de tempo e os ensaios foram feitos em triplicatas.

2.4 - Picnometria

A porosidade da fruta foi estimada a partir de suas densidades real e aparente conforme a expressão (22) assim como Cháfer et al. (2003); Giraldo et al. (2003) e Mújica-Paz et al. (2003).

$$\varepsilon = \frac{\rho_r - \rho}{\rho_r} \quad (22)$$

A densidade aparente da fruta foi medida por deslocamento de volume em um picnômetro que foi preenchido pela respectiva solução isotônica que era assim usado como líquido de referência. A densidade real também foi obtida por deslocamento de volume, entretanto, neste caso, pela degaseificação prévia da amostra imersa no líquido contido no picnômetro através da aplicação de vácuo (4,0 kPa por 30 minutos) como Cháfer et al. (2003). As determinações foram feitas em triplicatas.

3. Resultados e Discussões

Os tratamentos de impregnação a vácuo foram realizados em diferentes pressões e tiveram sempre a mesma duração. Todos os experimentos foram conduzidos sob a mesma temperatura e dois meios diferentes de imersão foram usados. O cálculo das frações dos volumes dos poros impregnadas (x_v) foi realizado assim como Fito (1994). As frações dos volumes das amostras impregnadas (x) foram determinadas, segundo método descrito por Salvatori (1997). A porosidade foi determinada através das densidades real e aparente obtidas por picnometria assim como descrito por Cháfer et al. (2003). A tabela 1 mostra as propriedades físico químicas da pêra argentina.

Tabela 1 - Propriedades físico químicas da pêra argentina.

Propriedades	Pêra argentina
Umidade ^a	87,5
Sólidos solúveis ^b	12,8
Atividade de água	0,989
Densidade aparente ^c	0,946
Densidade real ^c	1,082
Porosidade ^d	12,62

^a g de água/g da amostra x 100;

^b °Brix;

^c g/cm³

^d (%)

Assim como Fito e Pastor (1994), observou-se o ajuste dos dados experimentais ao modelo conforme visualizado na Figura 3, que mostra o resultado dos experimentos com solução de sacarose.

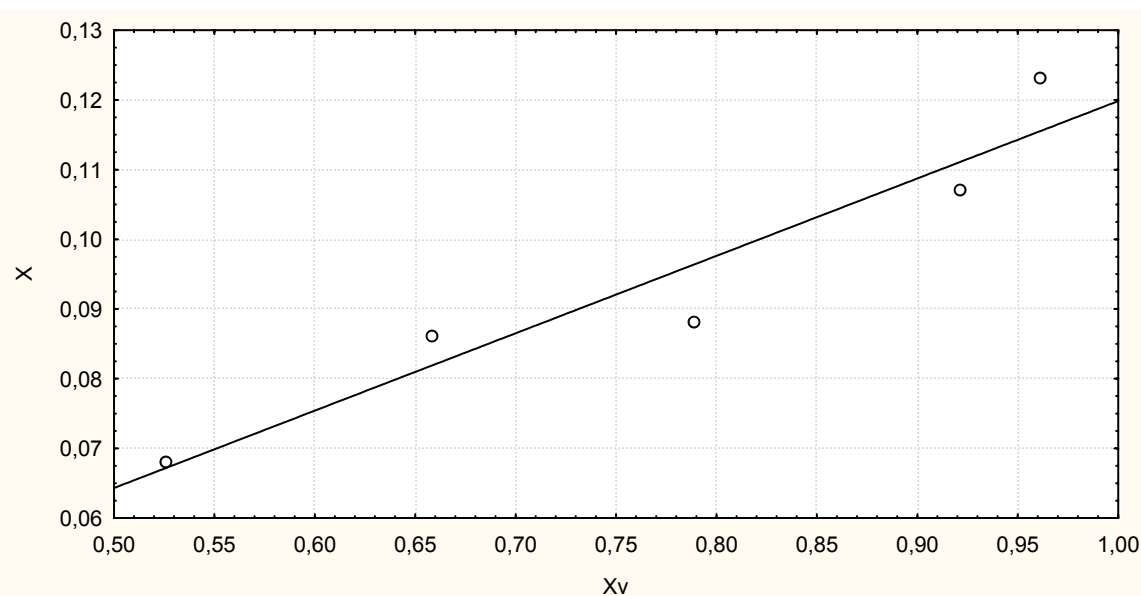


Figura 3 – Fração do volume das amostras de pêra impregnada pela solução (x) em função da fração do volume dos poros das amostras ocupada pela solução (x_v).

Assim fica evidente a precisão da teoria na predição das frações do volume dos poros e do volume da fruta impregnadas pela solução externa, x_v e x , respectivamente, para as pressões testadas. Segundo os autores, o coeficiente angular, que neste caso foi 0,111, é a porosidade efetiva da fruta. Recentemente, Mújica-Paz et al. (2003) também determinaram a porosidade através do modelo hidrodinâmico proposto por Fito e Pastor (1994), considerando o coeficiente angular como a porosidade efetiva. Consoante Fito e Pastor (1994), Fito (1994) e Fito et al. (1996), a porosidade efetiva é a relação entre o volume dos poros de um alimento e o volume inicial do alimento. O volume de poros de um alimento e o volume inicial do alimento são constantes ao longo dos processos onde as deformações são consideradas desprezíveis.

Nos três trabalhos mencionados, os autores idealizaram os poros dos alimentos, de maneira que os consideraram integralmente preenchidos por ar. Assim, o volume de poros é assumido como sendo igual ao volume de ar. Mais recentemente, Cháfer et al. (2003), Giraldo et al. (2003) e Mújica-Paz et al. (2003) obtiveram a porosidade de frutas através de suas densidades aparente e real, que diferem, entre si, pela densidade real não levar em consideração o volume gasoso. Por esta razão, essa porosidade determinada através das densidades é a relação entre o volume gasoso do alimento e seu volume. Assim, podem ser feitas comparações entre esses valores obtidos pelas densidades e aqueles através do modelo. Mújica-Paz et al. (2003) e Cháfer et al. (2003) compararam os valores de porosidade efetiva obtidos através dos modelos propostos por Fito e Pastor (1994) e por Fito et al. (1996), respectivamente, com aqueles obtidos através das densidades real e

aparente. Cháfer et al. (2003) constataram valores similares para todas as frutas que eles estudaram.

Baseado nesses fatos, determinou-se a porosidade da pêra argentina através de suas densidades real e aparente, a fim de se compará-la com o valor obtido da forma sugerida por Fito e Pastor (1994). Obteve-se, assim, o valor de 12,62 % e verificou-se que ambos os valores são então, similares, isto é: a porosidade determinada através das densidades é parecida com aquela fornecida pelo modelo, a porosidade efetiva, como observado por Cháfer et al. (2003). Esses autores observaram ainda que valores menores de porosidade efetiva resultaram do fato do equilíbrio mecânico não ter sido atingido no momento da retirada das amostras da solução e, então, da penetração do líquido não ter ocorrido em nível máximo. Os autores verificaram que a permanência das amostras por tempos maiores na solução após o restabelecimento da pressão atmosférica causaram um aumento na porosidade efetiva de algumas frutas.

Os valores de porosidade encontrados neste trabalho estão de acordo com o de porosidade efetiva determinada por Fito (1994). Entretanto, Salvatori (1997), trabalhando com pêra da variedade *Passa Crassana*, obteve um valor de porosidade efetiva muito diferente. O primeiro autor ainda obteve um coeficiente (angular) igual a 14,724%, ajustando os dados experimentais da pêra a uma reta. A tabela 2 mostra os valores de porosidade efetiva disponíveis na literatura e aqueles que foram obtidos nesta pesquisa.

Tabela 2 – Porosity value of pears according to different authors.

Propriedade	Pêra <i>Passa Crassana</i> (SALVATORI, 1997)	Pêra (FITO, 1994)	Pêra Buerre D'Anjou		
Umidade ^a	80,3	-----	87,5	---	----
Sólidos Sólúveis ^b	1,6	-----	12,8	---	----
Atividade de água	-----	-----	0,98	---	----
Densidade aparente ^c	1,030	-----	0,94	---	----
Densidade real ^c	1,070	-----	1,08	---	----
Porosidade ^d	3,4	14	12,62 ^e	11,1 ^f	11,33 ^g

Legenda: ^a (g_{água} / g_{amostra}) ; ^b (°Brix); ^c (g / cm³); ^d (%); ^e (valor obtido a partir das densidades); ^f (experimentos com solução de sacarose); ^g (experimentos com suco).

Os valores de porosidade obtidos nesta pesquisa talvez tenham se diferenciado tanto daqueles obtidos por Salvatori (1997) provavelmente pela diferença na variedade das frutas estudadas. Mújica-Paz et al (2003) observou que a fração do alimento impregnada

(x) bem como sua porosidade variam amplamente entre frutas, assim como entre variedades.

Os experimentos realizados com suco de pêra também se ajustaram bem a uma reta, como mostra a Figura 4.

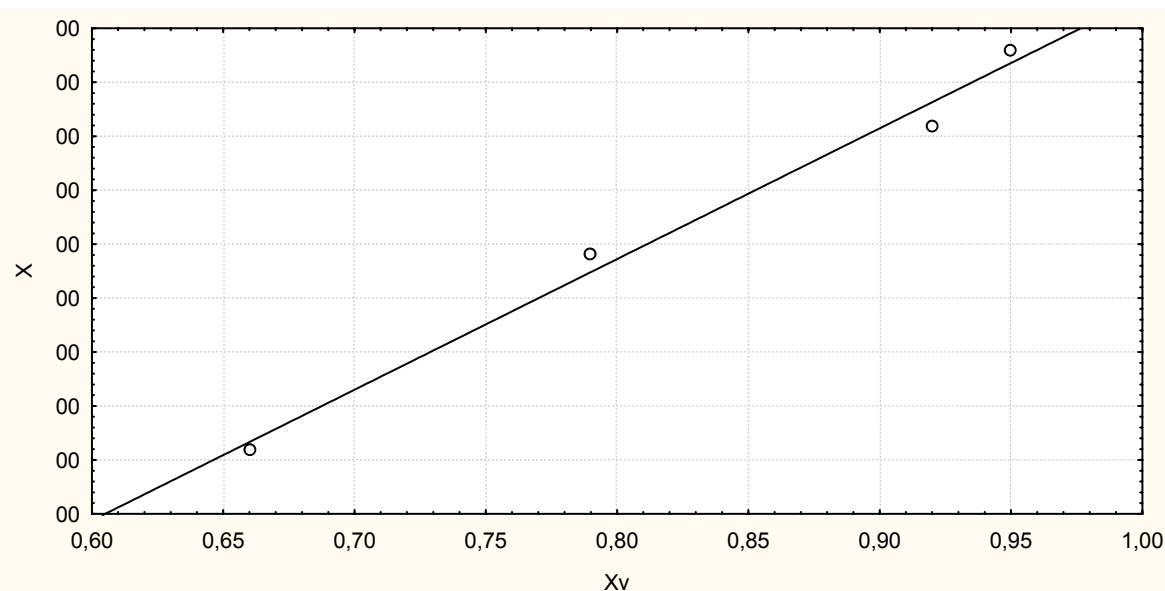


Figura 4 – Fração do volume das amostras de pêra impregnada pelo suco (x) em função da fração do volume dos poros das amostras ocupada pelo suco (x_v).

O coeficiente angular (0,1133) foi, aproximadamente, igual àquele obtido nos experimentos com solução isotônica: retas paralelas foram obtidas nos dois experimentos. Assim, aumentos iguais nas frações dos volumes dos poros impregnadas geram aumentos iguais nas frações dos volumes das frutas impregnadas. A diferença entre os dois experimentos foi notada pelos coeficientes lineares, que foi negativo no caso do suco: -3,4%. Fito (1994) obteve o valor de -0,62% para este coeficiente, trabalhando também com pêra. Diversos autores citaram a perda de líquido nativo da fruta como um fenômeno característico da etapa de vácuo. Giraldo et al. (2003) ressaltaram que o HDM promove fluxos rápidos em curtos intervalos de tempo e aponta a possível perda de líquido nativo, durante a etapa de vácuo, como um desses fluxos. Fito et al. (2001) salientaram que a saída do gás da matriz sólida durante a etapa de vácuo leva consigo o líquido nativo dos poros do alimento. Desta forma, uma diminuição do peso das amostras, durante a etapa de vácuo, pode ocorrer gerando erros na determinação de x , que passa por uma etapa gravimétrica, como se pode ver, através da equação 15. Esse fenômeno talvez tenha sido responsável pelo coeficiente linear negativo obtido nos experimentos a vácuo. Como as amostras

perdem peso, durante a etapa de vácuo, seria necessário um determinado nível de impregnação para repor as perdas de massa. Outros valores negativos foram obtidos por Fito (1994): manga (-8,77%), pêssego (-12,46%), abricó (-0,16%), abacaxi (-0,85%) e maçã (-1,72%). Valores positivos foram obtidos para mamão (2,68%) e banana (0,50%). Fito e Pastor (1994) obtiveram -0,5% para maçã.

O comportamento diferenciado de impregnação, usando suco e solução de sacarose, pode ter se dado em função da diferença entre os meios líquidos. Consoante Barat et al. (2001a) e Cháfer et al. (2003), a viscosidade afetou bastante a resposta ao processo de impregnação a vácuo. Estes últimos autores também observaram diferenças quanto as respostas a impregnação em função do soluto usado e apontaram possíveis diferenças na perda de líquido nativo e no ganho de solução.

O ajuste dos dados experimentais às retas paralelas, cujos coeficientes angulares são similares e se aproximam do valor de porosidade obtida através das densidades, dá indícios da coerência das considerações feitas nesta pesquisa.

Desta maneira, a pressão capilar deve ter, de fato, perdido importância nas faixas de pressões trabalhadas, como é previsto pela teoria para faixas baixas de pressões. Fito (1994) também desconsiderou a pressão capilar, observando que, algumas vezes, só foi possível ajustar uma reta na faixa de pressões baixas. Fito e Pastor (1994) demonstraram que o erro, ao se desprezar a pressão capilar no cálculo de x_v para pressões inferiores a 60 kPa), é menor que 2,5%.

Como as pressões de operação nesta pesquisa foram mais baixas que as adotadas em ambos os trabalhos, a influência da pressão capilar pode ter sido ainda menor; além de se propiciar frações de ocupação dos poros (x_v) maiores.

O tempo de aplicação do vácuo, 5 minutos, foi, assim, suficiente para que o fluxo de entrada de solução, durante o restabelecimento da pressão atmosférica, fosse aquele previsto pelo modelo, para as pressões usadas.

Consoante Mújica-Paz et al. (2003), a linearidade dos gráficos poderia indicar que não houve fenômenos de deformação permanentes durante os processos de impregnação. Isto está de acordo com o observado por Salvatori et al. (1998) e por Chiralt et al. (1999), que ressaltaram que deformações nas amostras em impregnação a vácuo são vistas como negligenciáveis para um grande número de frutas. Mújica-Paz et al. (2003) também obtiveram a porosidade efetiva de diversas frutas, usando o modelo proposto por Fito e Pastor (1994). O coeficiente angular, considerado a porosidade efetiva, foi 33,6% para maçã (*Malus sylvestris*, Mill variedade *golden delicious*); 7,1% para melão; 4,8% para

banana e 1,6% para mamão e manga. Os coeficientes lineares para essas frutas foram: 4,6%; 0,2%; 0,6%; 2,4% e 1,0%, respectivamente. O ajuste dos dados experimentais às retas foi dado pelos valores de R^2 , que foram: 99,8%; 99,7%; 99,5%; 97,1% e 97,4%, respectivamente.

Assim como Fito e Pastor (1994), Fito (1994) e Cháfer et al. (2003), Mújica-Paz et al. (2003) trabalharam com solução isotônica. Nos dois primeiros trabalhos, onde a verificação experimental do modelo foi feita em relação a várias frutas, os autores submeteram as amostras a 5 minutos de tratamento sob uma das pressões de trabalho, que foram de 103, 60, 40, 20, 10 e 5 kPa, e obtiveram bons resultados. Cháfer et al. (2003) obtiveram um valor médio de 33% para porosidade efetiva de casca de grapefruit e de casca de tangerina, 38% para casca de laranja e 42% para casca de limão, usando, em todos os casos, solução de sacarose.

Segundo a teoria, para a pressão mínima de trabalho adotada nesta pesquisa (4,0 kPa) e desprezando-se a pressão capilar, a fração do volume dos poros ocupada pela solução (x_v), após o restabelecimento da pressão atmosférica, quando o equilíbrio estático é alcançado, é de, aproximadamente, 96,05%.

4. Conclusão

Analisando os resultados obtidos nesta pesquisa perante a literatura, concluiu-se que o modelo de impregnação a vácuo estudado explicou, satisfatoriamente, os fenômenos de transporte de matéria. Fluxos hidrodinâmicos de massa devido a gradientes de pressão ocorreram e foram satisfatoriamente explicados pelo modelo hidrodinâmico. Com isso, pode-se compreender melhor os fenômenos de transferência de massa produzidos nas operações a vácuo onde um sólido poroso é imerso num líquido. Os fenômenos de transferência de massa foram amplamente influenciados pelas pressões de trabalho na fruta estudada.

As equações propostas permitiram o cálculo de volumes de líquido transferidos pelo mecanismo hidrodinâmico e explicaram a influência da pressão e das características microestruturais do alimento. As porosidades fornecidas pelo modelo e as obtidas através das densidades foram próximas, o que evidenciou a possibilidade de comparação entre ambos os valores e ratificou a abordagem teórica desenvolvida nas equações de (15) a (20).

Estudos futuros se fazem necessários para determinar a influência de possíveis perdas de líquido nativo, quando vácuo é aplicado.

Assim, o modelo mostrou-se útil para o cálculo dos volumes de solução transferidos para as amostras de pêra argentina e também para a determinação de sua

porosidade. A impregnação das soluções da forma observada sugeriu que os processos de impregnação a vácuo poderiam ser utilizados como um novo recurso tecnológico para o desenvolvimento de processos e produtos ao permitir a incorporação de solutos presentes em soluções, de maneira rápida e simples.

Referências bibliográficas

ANDRÉS, A.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Impregnacion a Vacio em Alimentos Porosos. Aplicacion al Salado de Quesos.** Universidade Politecnica de Valencia, Valencia (Espanã). 187p, 1995.

BARAT, J. M.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Modeling of Simultaneous Mass Transfer and Structural Changes in Fruit Tissues.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 77-85, 2001.

CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Microstructure and Vacuum Impregnation Response of Citrus Peels.** Food Research International, v.36, p. 35-41, 2003.

CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ORTOLÁ, M. D. & CHIRALT, A. **Long term osmotic dehydration of orange peel at atmospheric pressure and by applying a vacuum pulse.** Food Science and Technology International, 7(6), p. 511-520, 2001.

CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ORTOLÁ, M. D.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Kinetics of osmotic dehydration in orange and mandarin peels.** Journal of Food Process engineering, v. 24(102), p.273-289, 2001.

FITO, P. **Modeling of Vacuum Osmotic Dehydration of Food.** Journal of Food Engineering, v.22, p.313-328, 1994.

FITO, P. & PASTOR, R. **Non-difusional Mechanism occurring during vacuum osmotic dehydration (VOD).** Journal of Food Engineering, v.21, p.513-519, 1994.

FITO, P.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & PARDO, P. **Coupling of Hydrodynamic Mechanism and Deformation-Relaxation Phenomena During Vacuum Treatments in Solid Pours Food-Liquid Systems.** Journal of Food Engineering, v. 27, p. 229-240, 1996.

FITO, P.; CHIRALT, A.; BARAT, J.M.; ANDRÉS, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J. & MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. **Vacuum Impregnation for Development of New Dehydrated Products.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 297-302, 2001.

GIRALDO, G.; TALENS, P.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Influence of Sucrose Solution Concentration on Kinetics and Yield During Dehydration of Mango.** Journal of Food Engineering, v. 58, p. 33-43, 2003.

HOFMEISTER, L.C. **Estudo da impregnação a vácuo em alimentos porosos.** Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MÚJICA-PAZ, H.; VALDEZ-FRAGOSO, A.; LÓPEZ-MALO, A.; PALOU, E. & WELTI-CHANES, J. **Impregnation Properties of Some Fruits at Vacuum Pressure.** Journal of Food Engineering, v. 56, p.307-314, 2003.

PREGNOLATTO, W. & PREGNOLATTO, N. P. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz – Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos.** Instituto Adolfo Lutz, 3ª ed, São Paulo (Brasil), 1985.

SALVATORI, D. **Deshidratación osmótica de frutas: cambios composicionales y estructurales a temperaturas moderadas.** Ph. D. thesis. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.1997.

SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & FITO, P. **The response of some properties of fruits to vacuum impregnation.** Journal of Food Processing and Preservation, v. 21, p.59-73, 1998.

SHI, X. Q. & FITO, P. & CHIRALT, A. **Influence of Vacuum Treatment on Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits.** Food Research International, v. 28, n.5, p.445-454, 1995.

TAPIA DE DAZA, M. S.; ALZAMORA, S. M., & WELTI-CHANES, J. **Combination of preservation factors applied to minimal processing of foods.** Critical Reviews in Food Science and Nutrition. V. 36, p. 629-659, 1996.

TAPIA DE DAZA, M.S., LÓPEZ-MALO, A., CONSUEGA, R., CORTE, P., & WELTI-CHANES, J. **Minimally processed papaya by vacuum osmotic dehydration (VOD) techniques.** Food Science and Technology International, v.5, p. 43-52, 1999.

**CAPÍTULO V –
CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este estudo permitiu verificar o comportamento da pêra argentina perante a desidratação osmótica, sob diversas condições de pressão, e perante a impregnação a vácuo.

Verificou-se que a aplicação de vácuo influenciou sobre as trocas de matéria, nas operações em que o alimento poroso era mantido imerso em uma fase líquida.

Nos processos de desidratação osmótica, encontraram-se comportamentos diferenciados, para cada tratamento: DO, DOV e DOPV. Neste trabalho, constatou-se que a taxa de perda de água a vácuo aumentou nos tratamentos onde vácuo contínuo foi aplicado. Entretanto, onde ocorreu somente o pulso de vácuo, a perda foi diminuída.

Constatou-se, ainda, que o ganho de açúcar foi influenciado por todas as formas de aplicação de vácuo, sempre aumentando com este tratamento. Foi máximo nos tratamentos onde a pressão atmosférica foi restabelecida nos primeiros minutos (tratamento com pulso de vácuo).

Também foi visto que os tratamentos a vácuo contínuo implicaram em reduções mais rápidas da atividade de água e a pressão atmosférica. Todavia, a aplicação do pulso de vácuo revelou-se capaz de tanto aumentar quanto de diminuir a queda da atividade de água, dependendo da temperatura. Além deste fenômeno, a temperatura aumentou as transferências de água, e não exerceu influência significativa sobre o ganho de açúcar.

Segundo os resultados obtidos, pôde-se notar que as variáveis de processo poderiam ser combinadas para se obter produtos com diferentes características. A redução do tempo de tratamento e da temperatura, sem redução da perda de água era possível, até certo ponto, pela aplicação de vácuo contínuo.

Nas operações de impregnação, foi evidenciada uma grande penetração de solução, no interior das frutas. Quanto menor era a pressão de trabalho, maior era o fluxo de solução. Conforme o modelo hidrodinâmico, a fração impregnada das amostras dependeu linearmente do percentual dos poros ocupados pela solução, calculado em função das pressões de trabalho. As equações propostas mostraram-se, então, úteis para o cálculo de quantidades de líquidos transferidos para o interior das frutas, hidrodinamicamente. O

modelo propiciou, desta forma, a melhor compreensão dos fenômenos de transferência de massa produzidos nas operações de impregnação, com líquidos, do alimento sólido poroso, a vácuo. Explicou, ainda, a influência da pressão e das características microestruturais do alimento, nos fenômenos de transferência de massa, a vácuo.

A porosidade efetiva da fruta argentina (coeficiente angular da reta obtida com solução de sacarose) se revelou próxima a porosidade obtida pelas densidades real e aparente e semelhante ao coeficiente angular da reta obtida com o suco. Todos esses três valores obtidos nesse trabalho situam-se próximos a porosidade efetiva encontrada na literatura para pêra.

A grande diferença entre os processos a vácuo e a pressão atmosférica ficou bem evidenciada pela significativa discrepância de cores entre os tecidos de frutas submetidas àquelas condições. A intensa colorização de quase todo o tecido das frutas indicou que os poros da pêra são interligados.

Assim, a incorporação de ingredientes pode ser possível de maneira rápida e simples, o que está de acordo com a literatura onde postulou-se a viabilidade de incorporar quaisquer ingredientes em produto poroso, mediante a operação de impregnação a vácuo.

Desta forma, a impregnação a vácuo pode ser considerada como um recurso para o desenvolvimento de produtos de frutas, o que já havia sido ressaltado na literatura.

A porosidade fornecida pelo modelo e a obtida através das densidades foram próximas, o que evidenciou a possibilidade de comparação entre ambos os valores.

Com o propósito de complementar este trabalho e de estender a tecnologia a vácuo ao âmbito industrial, pesquisas futuras poderiam ser conduzidas como sugerido a seguir:

Aprofundamento do estudo das variáveis do processo de desidratação osmótica a vácuo e teste desta nova tecnologia em planta piloto, visando verificar a viabilidade tecnológica e econômica deste processo.

Considerando a diferença entre as respostas à impregnação a vácuo obtidas com solução isotônica e com suco da fruta, sugerem-se estudos futuros para determinar que tipo de influência essa mudança de meio pode ter causado. A perda de líquido nativo da fruta durante a aplicação de vácuo deveria ser considerada em tal estudo.

Sugere-se, também, o estudo do comportamento de outros alimentos a fim de verificar se o HDM também explica satisfatoriamente os fenômenos de transferência de massa que ocorrem sob vácuo.

A determinação da porosidade efetiva de outras frutas também deveria ser conduzida visto que essa característica estrutural desempenha um papel fundamental nos processos de impregnação.

Estudos realizados com o intuito de desenvolver novos produtos ou novos processos poderiam ser conduzidos com a pêra argentina utilizando vácuo e o modelo hidrodinâmico na predição de volumes de líquido transferidos para o interior do alimento.

**CAPÍTULO VI –
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

CAPÍTULO VI –

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉS, A.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Impregnacion a Vacio em Alimentos Porosos. Aplicacion al Salado de Quesos.** Universidade Politecnica de Valencia, Valencia (Espanã). 187p, 1995.

AZEREDO, H.M.C. & JARDINE, J.G. **Desidratação Osmótica de Abacaxi Aplicada à Tecnologia de Métodos Combinados.** Ciência e Tecnologia dos Alimentos, v. 20, no.1, p. 78-82, 2000.

BARAT, J. M.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Modeling of Simultaneous Mass Transfer and Structural Changes in Fruit Tissues.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 77-85, 2001.

CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Microstructure and Vacuum Impregnation Response of Citrus Peels.** Food Research International, v.36, p. 35-41, 2003.

CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ORTOLÁ, M. D. & CHIRALT, A. **Long term osmotic dehydration of orange peel at atmospheric pressure and by applying a vacuum pulse.** Food Science and Technology International, 7(6), p. 511-520, 2001.

CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ORTOLÁ, M. D.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Kinetics of osmotic dehydration in orange and mandarin peels.** Journal of Food Process engineering, v. 24(102), p.273-289, 2001.

CHIRALT, A.; FITO, P.; J.M.; ANDRÉS, A.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ESCRICHE, I. & CAMACHIO, M.M. **Use of Vacuum Impregnation in Food Salting Process.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 141-151, 2001.

FITO, P. **Modeling of Vacuum Osmotic Dehydration of Food.** Journal of Food Engineering, v.22, p.313-328, 1994.

FITO, P. & PASTOR, R. **Non-difusional Mechanism occurring during vacuum osmotic dehydration (VOD).** Journal of Food Engineering, v.21, p.513-519, 1994.

FITO, P.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & PARDO, P. **Coupling of Hydrodynamic Mechanism and Deformation-Relaxation Phenomena During Vacuum Treatments in Solid Pours Food-Liquid Systems.** Journal of Food Engineering, v. 27, p. 229-240, 1996.

FITO, P.; CHIRALT, A.; BARAT, J.M.; ANDRÉS, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J. & MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. **Vacuum Impregnation for Development of New Dehydrated Products.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 297-302, 2001.

- FITO, P.; CHIRALT, A.; BETORET, N.; GRAS, M.; CHÁFER, M.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; ANDRÉS, A. & VIDAL, D. **Vacuum Impregnation and Osmotic Dehydration in Matriz Engineering. Application in Functional Fresh Food Development.** *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 175-183, 2001.
- GIRALDO, G.; TALENS, P.; FITO, P. & CHIRALT, A. **Influence of Sucrose Solution Concentration on Kinetics and Yield During Dehydration of Mango.** *Journal of Food Engineering*, v. 58, p. 33-43, 2003.
- GONZÁLES, C.; FUENTES, C.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Effectiveness of Vacuum Impregnation Brining of Manchego-Type Curd.** *International Dairy Journal*, v.9, p. 143-148, 1999.
- GRAS, M.; VIDAL-BROTÓNS, D.; BETORET, N.; CHIRALT, A. & FITO, P. **The Response of Some Vegetables to Vacuum Impregnation.** *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v.3, p. 263-269, 2002.
- HOFMEISTER, L.C. **Estudo da impregnação a vácuo em alimentos porosos.** Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado apresentada a em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- ISSE, M.G. & SCHUBER, H. **Osmotic dehydration of mango. Mass transfer between mango and syrup.** In: D. Behrens (Ed). *Proceedings of the fourth world congress of chemical engineering.* Karlsruhe. p 738-745, 1991.
- MATA, M. & FITO, P. **Vacuum osmotic dehydration of foods (VOD) I: Design and evaluation of a pilot plant.** In *ISOPOW-V*, Valencia, Spain, p. 260, 1992.
- MÚJICA-PAZ, H.; VALDEZ-FRAGOSO, A.; LÓPEZ-MALO, A.; PALOU, E. & WELTI-CHANES, J. **Impregnation Properties of Some Fruits at Vacuum Pressure.** *Journal of Food Engineering*, v. 56, p.307-314, 2003.
- PASTOR, R. MATA, M., FITO, P. **Deshidratación Osmótica de manzana.** *Anales de Investigación del Master em Ciencia e Ingeniería de Alimentos.* Vol. 1. SPUPV. Valencia, Spain. p 857-874, 1992a.
- PASTOR, R. MATA, M., FITO, P. **Vacuum osmotic dehydration of foods (VOD) II. Introduction to modelization of transfer phenomena in apple (*Granny Smith*) drying.** In *ISOPOW-V*. Valencia, Spain, 1992b.
- PREGNOLATTO, W. & PREGNOLATTO, N. P. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz – Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos.** Instituto Adolfo Lutz, 3ª ed, São Paulo (Brasil), 1985.
- ROSA, M. D. & GIROUX, F. **Osmotic Treatments (OT) and Problems Related to Solution Management.** *Journal of Food Engineering*, v.49. p. 223-236, 2001.

- SACCHETTI, G.; GIANOTTI, A. & ROSA, M.D. **Sucrose-Salt Combined Effects on Mass Transfer Kinetics and Product Acceptability. Study on Apple Osmotic Treatments.** Journal of Food Engineering, v.49, p.163-173, 2001.
- SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & FITO, P. **Osmotic Dehydration Progression in Apple Tissue I: Spatial Distribution of Solutes and Moisture Content.** Journal of Food Engineering, v. 42, p.125-132, 1994.
- SALVATORI, D. **Deshidratación osmótica de frutas: cambios composicionales y estructurales a temperaturas moderadas.** Ph. D. thesis. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.1997.
- SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & FITO, P. **The response of some properties of fruits to vacuum impregnation.** Journal of Food Processing and Preservation, v. 21, p.59-73, 1998.
- SHI, X. Q. & FITO, P. **Vacuum Osmotic Dehydration of Fruits.** Drying Technology, v.11, n.6, 1429-1442, 1993.
- SHI, X. Q. & FITO, P. **Mass Transfer in Vacuum Osmotic Dehydration of Fruits. A Mathematical Model Approach.** Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie, v. 27, p.67-72, 1994.
- SHI, X. Q. & FITO, P. & CHIRALT, A. **Influence of Vacuum Treatment on Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits.** Food Research International, v. 28, n.5, p.445-454, 1995.
- TAPIA DE DAZA, M. S.; ALZAMORA, S. M., & WELTI-CHANES, J. **Combination of preservation factors applied to minimal processing of foods.** Critical Reviews in Food Science and Nutrition. V. 36, p. 629-659, 1996.
- TAPIA DE DAZA, M.S., LÓPEZ-MALO, A., CONSUEGA, R., CORTE, P., & WLETI CHANES, J. **Minimally processed papaya by vacuum osmotic dehydration (VOD) techniques.** Food Science and Technology International, v.5, p. 43-52, 1999.

ANEXOS

ANEXOS

Nesta seção são apresentadas as Figuras referentes aos experimentos realizados com azul de metileno (0,4g/L) a 20°C e sob 1,3 kPa (pressão absoluta) ou sob pressão atmosférica. A preparação da fruta foi feita de diferentes maneiras e os tempos de tratamento foram variados.

As Figuras A1 a A4 referem-se a experimentos realizados com peras descascadas, descaroçadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 1,3 kPa durante 10, 15, 30, 40, 60 e 80 minutos.

As Figuras A5 a A7 referem-se a experimentos realizados com peras descascadas, descaroçadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante 10, 20, 30, 45, 60 e 90 minutos.

As Figuras A8 e A9 referem-se a experimentos realizados com peras descascadas, descaroçadas e cortadas meio antes do tratamento a 1,3 kPa durante 5, 15, 30 e 60 minutos.

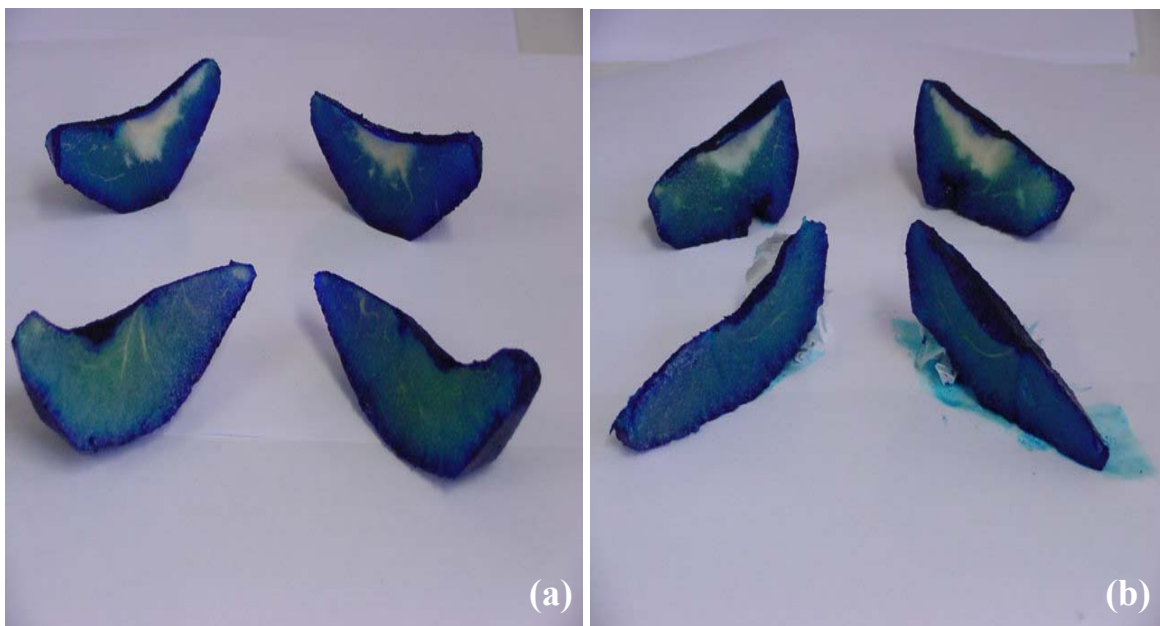


Figura A1 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 1,3 kPa durante 10 minutos (a) e 15 minutos (b).

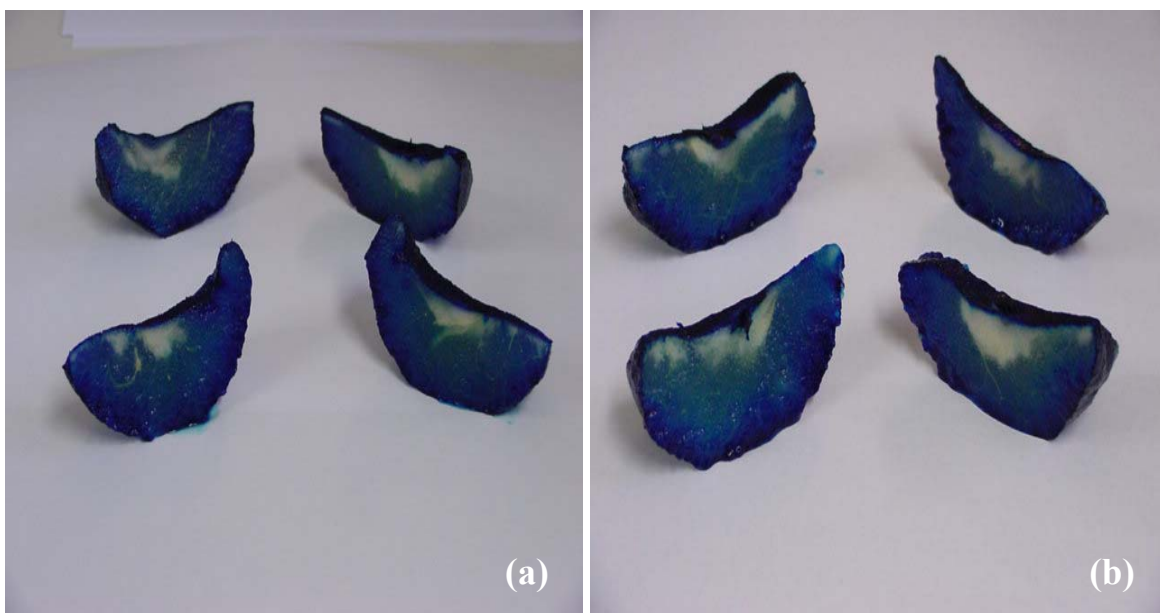


Figura A2 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 1,3 kPa durante 30 minutos (a) e 40 minutos (b).

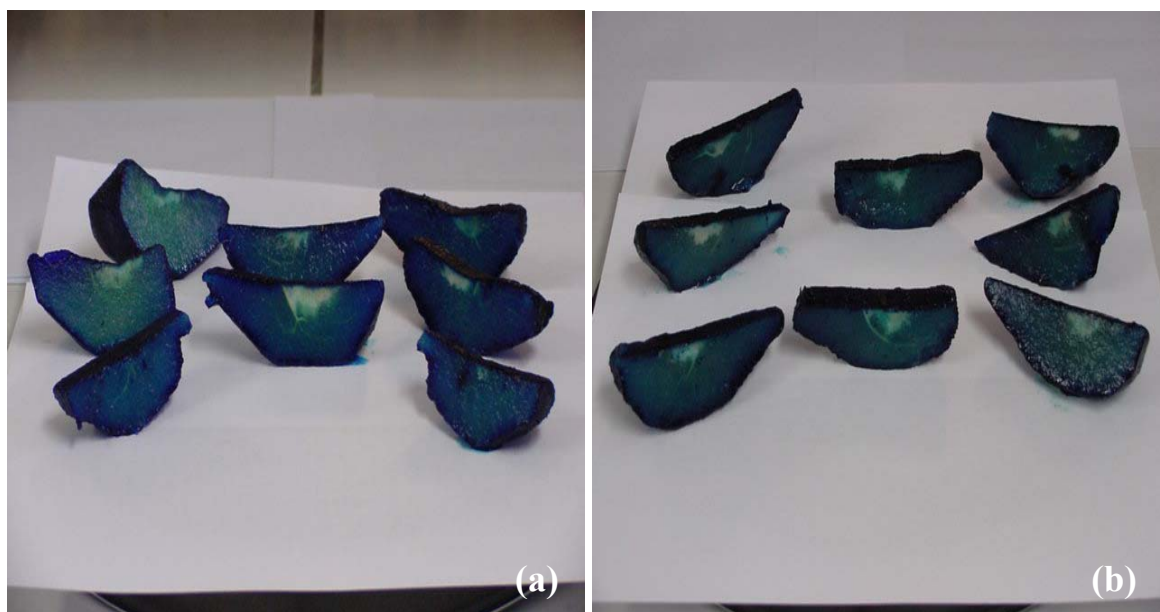


Figura A3 – Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 1,3 kPa durante 40 minutos (a) e 60 minutos (b).

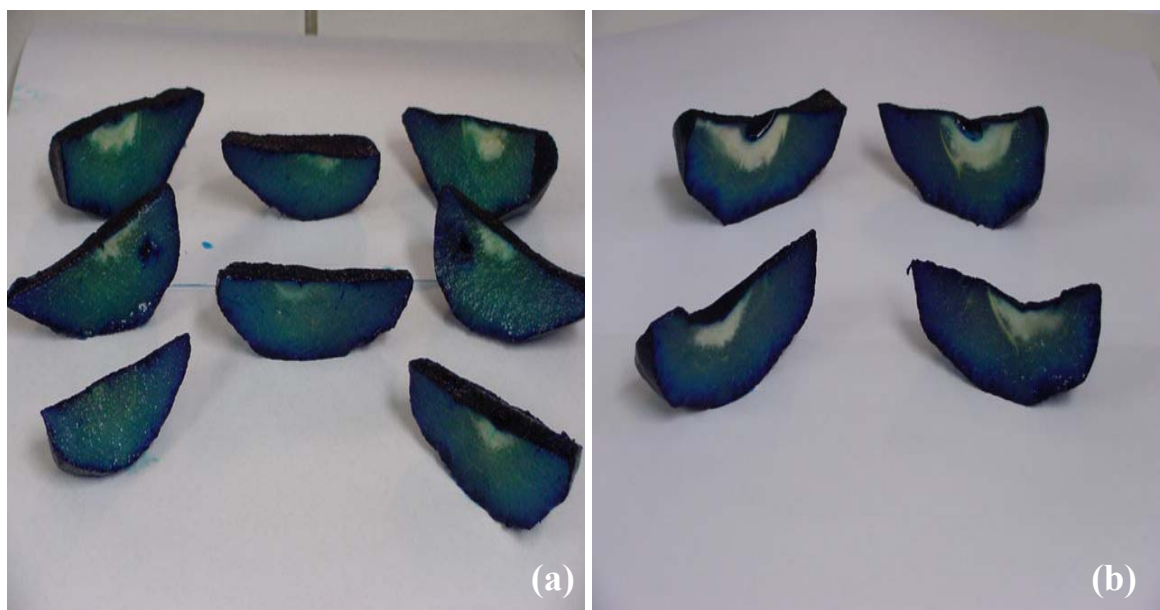


Figura A4 – Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a 1,3 kPa durante 80 minutos (a) e 90 minutos (b).

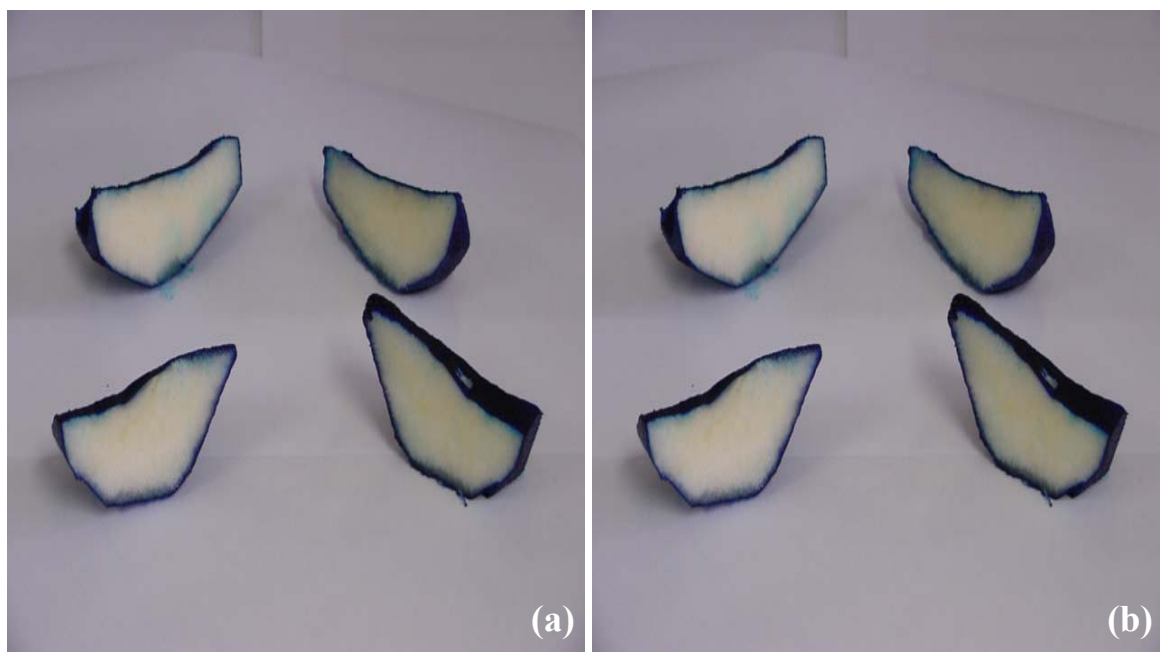


Figura A5 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante 10 minutos (a) e 20 minutos (b).

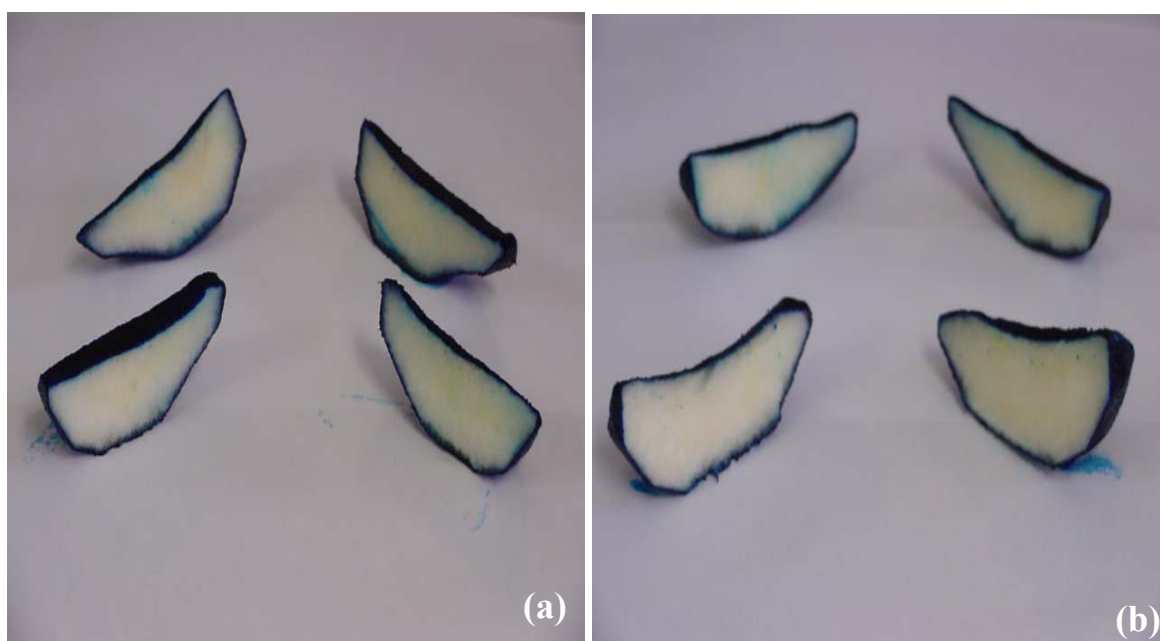


Figura A6 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante 30 minutos (a) e 45 minutos (b).

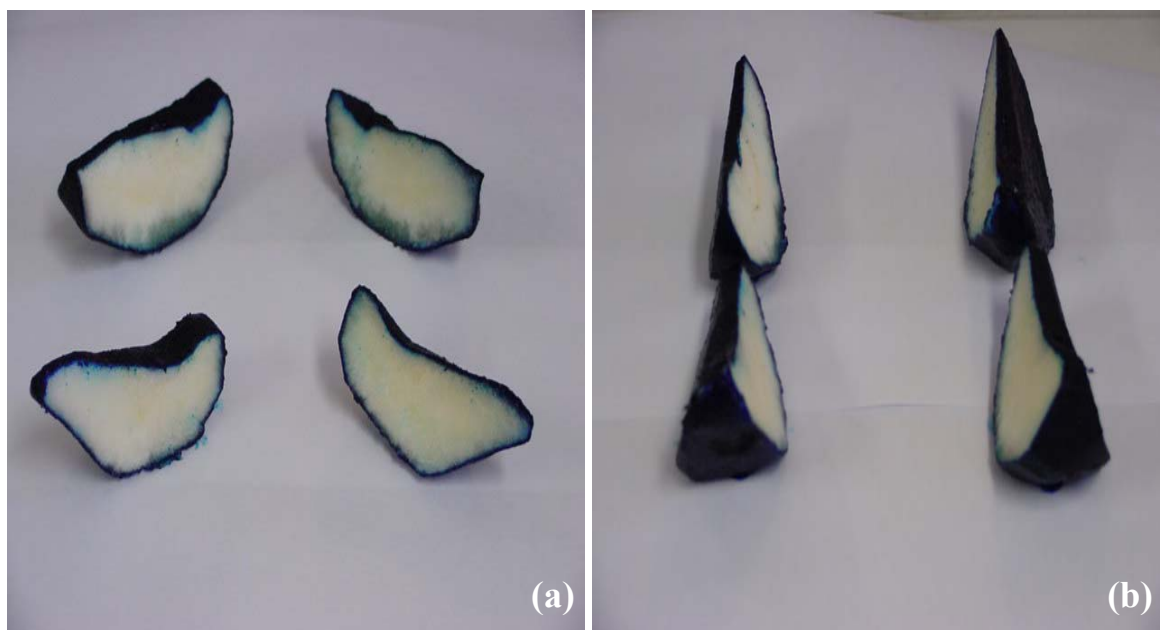


Figura A7 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas em quartos antes do tratamento a pressão atmosférica durante 60 minutos (a) e 90 minutos (b).

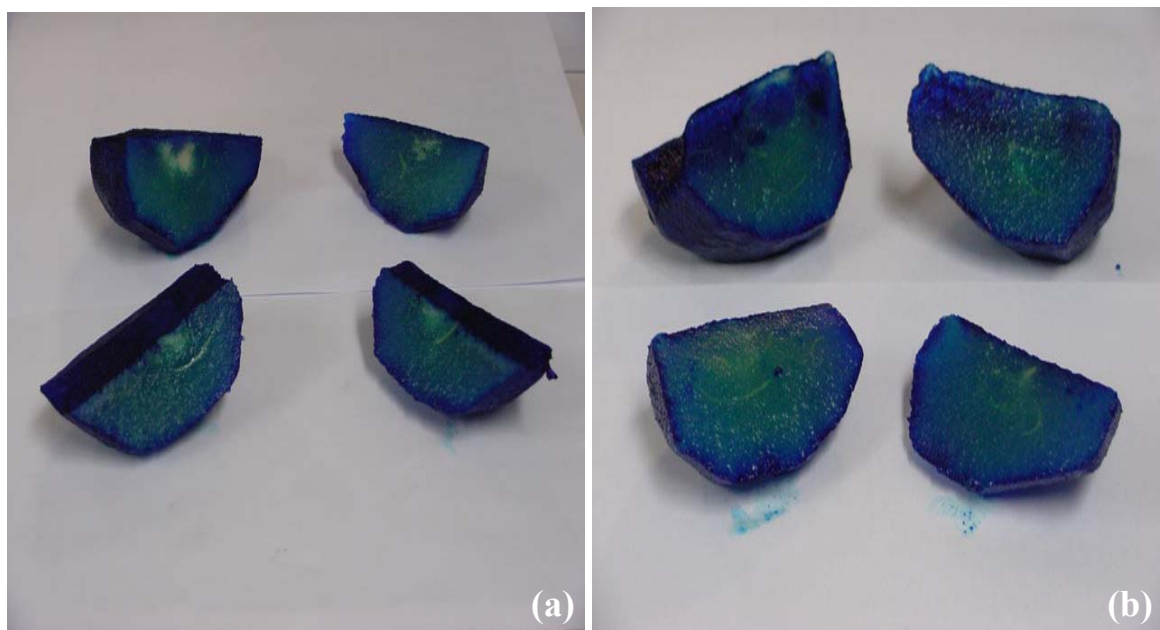


Figura A8 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas ao meio antes do tratamento a 1,3 kPa durante 5 minutos (a) e 15 minutos (b).

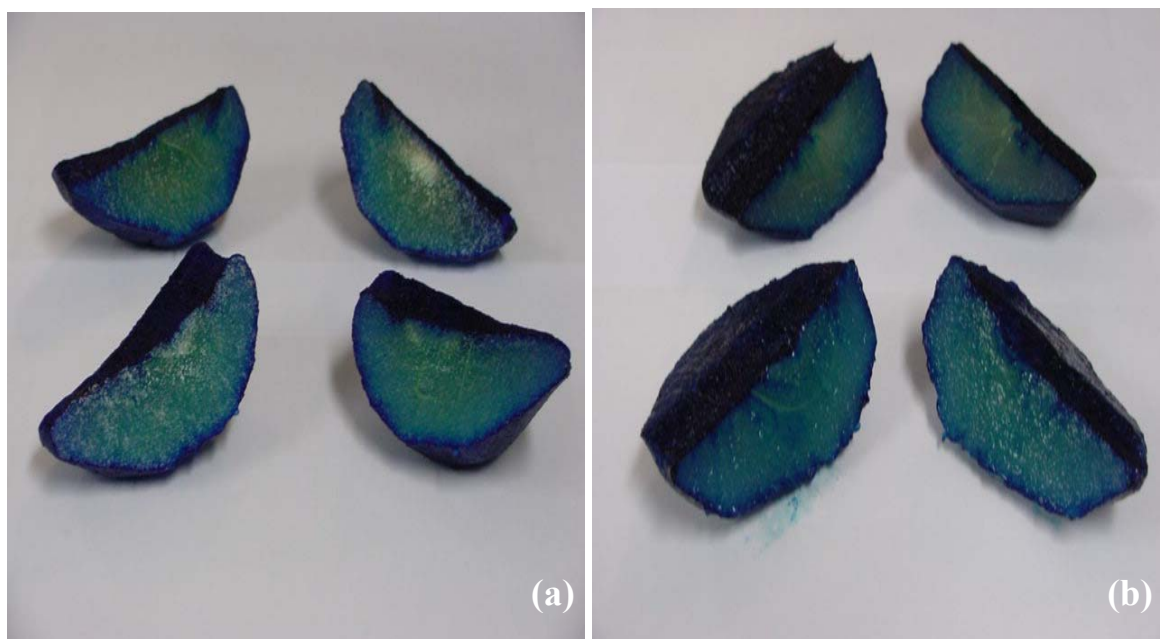


Figura A9 - Peras descaroçadas, descascadas e cortadas ao meio antes do tratamento a 1,3 kPa durante 30 minutos (a) e 60 minutos (b).