

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Desidratação Osmótica de Maçã Gala Assistida por Campo Elétrico  
Moderado**

- Dissertação de Mestrado -

Aline Fronza

Porto Alegre

2019



---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Desidratação Osmótica de Maçã Gala Assistida por Campo Elétrico  
Moderado**

Aline Fronza

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**Orientadora:**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ligia Damasceno Ferreira Marczak**

**Co-orientadora:**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Giovana Domeneghini Mercali**

Porto Alegre

2019



---

## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente, gostaria de agradecer às professoras Ligia Damasceno Ferreira Marzack e Giovana Domeneghini Mercali pela orientação, ensinamentos e disponibilidade no decorrer do trabalho.*

*Aos colegas do LATEPA, por todos os momentos compartilhados, os quais ajudaram a tornar a rotina do laboratório mais agradável.*

*A todos os bolsistas que auxiliaram na execução dos experimentos, especialmente ao Gabriel, Giorgio e Matheus.*

*Aos técnicos da central analítica, por todo suporte e atenção durante a realização de algumas análises.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRGS, em especial aos professores que contribuíram com a minha formação.*

*A toda minha família, pelo apoio constante e ensinamentos ao longo da minha vida.*

*E finalmente, ao meu companheiro de todos os momentos, Milton, por todo amor, carinho e compreensão.*

*Obrigada a todos!*



---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Desidratação Osmótica de Maçã Assistida por Campo Elétrico Moderado*, elaborada por Aline Fronza, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vivian Caetano Bocchi

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Bethania Brochier

---

Prof. Dr. Marcio Schwaab



---

## Resumo

A desidratação osmótica (DO) é um processo de secagem que consiste em colocar os alimentos em contato com soluções concentradas de sólidos solúveis, reduzindo assim a atividade de água dos alimentos. Um dos problemas da aplicação desta tecnologia é o longo tempo necessário para que o processo atinja o estado estacionário. A aplicação de campo elétrico moderado (MEF) durante o processo pode torná-lo mais rápido e, portanto, uma opção quando se trata de preservação de alimentos em grande escala. O uso de MEF pode promover aumento nas taxas de transferência de massa devido aos efeitos não térmicos da eletroporação e permeabilização das células do alimento. Neste contexto, os objetivos do trabalho foram estudar a cinética do processo de transferência de massa durante a DO assistida por MEF de maçãs, avaliando os efeitos não térmicos dessa tecnologia na taxa de secagem do processo. Os experimentos foram realizados com soluções de sacarose (40, 50 e 60%, m/m), utilizando uma proporção amostra/solução de 1:15 (m/m). As amostras foram submetidas a diferentes tensões elétricas (0, 85 e 170 V), mantendo a temperatura constante (40 °C). Análises de umidade, sólidos solúveis e açúcares totais foram realizadas ao longo das 4 horas do processo de desidratação osmótica, enquanto que as análises de cor e textura foram realizadas para a maçã *in natura* e após cada tratamento. Adicionalmente, quantificou-se a capacidade redutora e avaliaram-se as mudanças estruturais da maçã *in natura* e da amostra processada para os tratamentos com 60% de sacarose com e sem aplicação de MEF. Os resultados mostraram que a concentração da solução de sacarose e a aplicação de MEF influenciam na perda de água (*WL*) e no ganho de sólidos (*SG*) da maçã. Além disso, o modelo clássico de Peleg mostrou-se adequado para a determinação do conteúdo de umidade e de sacarose no equilíbrio, assim como o modelo de difusão da Segunda Lei de Fick para a determinação da difusividade mássica efetiva da água e da sacarose na maçã. A difusividade mássica efetiva da água variou de  $6,23 - 11,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , enquanto que a da sacarose variou de  $2,1 - 3,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , apresentando os maiores resultados para o tratamento com 60% de sacarose e aplicação de tensão elétrica de 170 V. O teor de sacarose e o MEF aplicado influenciam nos resultados de cor, porém, o aumento na tensão elétrica aplicada causa maior influência sobre a variação total de cor ( $\Delta E^*$ ) da maçã. Para os parâmetros de textura avaliados, a dureza, coesão e elasticidade foram influenciadas pelo teor de sacarose e aplicação de MEF. Por outro lado, a fragilidade foi afetada somente pelo teor de sacarose da solução osmótica. Através da análise microestrutural realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível constatar que ambos tratamentos avaliados causaram alterações no tecido da maçã, sendo essas alterações mais evidentes quando o MEF foi aplicado. Além disto, a aplicação de MEF também ocasionou decréscimo da capacidade redutora da maçã. De forma geral, é possível concluir que a aplicação do MEF é uma alternativa interessante para intensificar a transferência de massa em processos de desidratação osmótica.

**Palavras-chave:** transferência de massa, eletricidade, secagem, eletroporação, difusividade mássica.

---

## Abstract

*Osmotic dehydration (OD) is a drying process that consists in placing the food in contact with concentrated solutions of soluble solids, thus reducing its water activity. One of the drawback of this technology is the long time necessary to the process to reach steady state. The application of Moderate Electric Field (MEF) during the process can make it faster and, therefore, an option when it comes to large-scale food preservation. The use of MEF may promote increase of mass transfer rates due to the non-thermal effects of electroporation and permeabilization of the cells of the food. In this context, the objectives of the present work was to study the mass transfer process kinetics during OD assisted by MEF of apples, evaluating the non-thermal effects of this technology on drying rate. The experiments were conducted with sucrose solutions (40, 50 and 60%, m/m), using a sample/solution proportion of 1:15 (m/m). Samples were submitted to different electrical voltages (0, 85 and 170 V), keeping the temperature constant (40 °C). Moisture, soluble solids and total sugars were analyzed during the 4 hours of the osmotic dehydration process, while color and texture analyzes were performed for the fresh sample and after each treatment. In addition, the reducing capacity and the structural changes of the fresh sample and the processed sample were evaluated for 60% sucrose treatments with and without MEF application. The results showed that the concentration of the sucrose solution and the application of MEF influenced the loss of water (WL) and the gain of solids (SG) of the sample. Moreover, the classical Peleg model was suitable for the determination of content of moisture and sucrose in equilibrium, as well as the use of the diffusion model of the Second Law of Fick to determine the effective mass diffusivity of water and sucrose in apple. The effective mass diffusivity of water ranged from  $6.23 - 11.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , while that of sucrose varied from  $2.1 - 3.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , presenting the highest results for the treatment with 60% of sucrose and application of electric voltage of 170 V. The color analysis indicates that the sucrose content and the applied MEF influenced the results, but, the increase in the applied electric voltage causes greater influence on the variation total color ( $\Delta E^*$ ) of the apple. For the evaluated texture parameters, the hardness, cohesiveness and springiness were influenced by the sucrose content and the application of MEF, however, the brittleness was affected only by the sucrose content of the osmotic solution. Through the microstructural analysis performed by Scanning Electron Microscopy (SEM) it was possible to verify that both evaluated treatments caused changes in the apple tissue, becoming more evident when applied MEF. Moreover, the application of MEF also caused decrease in the total reducing capacity of the apple. Overall, the application of MEF is an interesting alternative to intensify mass transfer in osmotic dehydration processes.*

**Keywords:** mass transfer, electricity, drying, electroporation, mass diffusivity.

---

## Sumário

Capítulo 1 – Introdução .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Capítulo 2 - Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Maçã.....	4
2.1.1 Aspectos Gerais .....	4
2.1.2 Composição Nutricional .....	7
2.1.3 Compostos Fenólicos.....	8
2.2 Textura.....	9
2.3 Desidratação Osmótica.....	11
2.3.1 Difusividade Mássica Efetiva .....	13
2.3.2 Modelo de Peleg .....	15
2.4 Campo Elétrico Moderado .....	16
2.5 Desidratação Osmótica Associada ao Campo Elétrico Moderado.....	19
Capítulo 3 - Materiais e Métodos .....	21
3.1 Preparo da Amostra e da Solução de Sacarose.....	21
3.2 Procedimento Experimental .....	22
3.3 Análises Físico-Químicas.....	25
3.3.1 Umidade.....	25
3.3.2 Teor de Açúcares .....	25
3.3.3 Capacidade Redutora.....	27
3.3.4 Textura.....	28
3.3.5 Cor .....	28
3.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	29
3.4 Parâmetros da Desidratação Osmótica .....	30
3.5 Modelo Matemático .....	30
3.6 Planejamento Fatorial e Análise Estatística .....	31

---

Capítulo 4 - Resultados e Discussão .....	33
4.1 Artigo.....	33
4.2 Resultados Complementares .....	54
4.2.1 Teor de Umidade no Equilíbrio .....	54
4.2.2 Teor de Sacarose no Equilíbrio.....	59
4.2.3 Textura.....	65
Conclusões.....	72
Sugestões para Trabalhos Futuros .....	74
Referências Bibliográficas.....	75
Apêndice A.....	81
Apêndice B .....	82

---

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Maçã Gala .....	6
Figura 2.2 - Estrutura química básica dos compostos fenólicos .....	8
Figura 2.3 - TPA típica para cubos de maçã.....	10
Figura 2.4 - Representação esquemática dos processos de transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica. ....	12
Figura 2.5 - Representação da eletroporação reversível e irreversível.....	18
Figura 3.1 - Cubos de maçã .....	22
Figura 3.2 - Sistema experimental de desidratação osmótica assistida por MEF: (a) célula cilíndrica encamisada, (b) banho de aquecimento, (c) banho de resfriamento, (d) variador de tensão, e) estabilizador e f) sistema de aquisição de dados. ....	23
Figura 3.3 - Interface do software utilizado para aquisição de dados. ....	23
Figura 3.4 - Célula utilizada nos experimentos .....	24
Figura 3.5 - Cubos de maçã para determinação da perda de massa .....	24
Figura 3.6 - Curva de calibração para determinação de açúcares .....	26
Figura 3.7 - Curva padrão para determinação de capacidade redutora. ....	27
Figura 4.1 - Variação adimensional do teor de umidade em função do tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de maçã.....	55
Figura 4.2 - Valores experimentais em função dos valores previstos para $x^{\infty w}$ .....	58
Figura 4.3 - Linhas de contorno para o teor de umidade no equilíbrio ( $x^{\infty w}$ ) em função da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada. ....	59
Figura 4.4 - Variação adimensional do teor de sacarose em função do tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de maçã.....	61
Figura 4.5 - Valores experimentais em função dos valores previstos para $x^{\infty s}$ .....	64
Figura 4.6 - Linhas de contorno para o teor de sacarose no equilíbrio ( $x^{\infty s}$ ) em função da tensão elétrica (V) aplicada e da concentração de sacarose (%). ....	65
Figura 4.7 – Coesão normalizada após 4 horas de DO.....	66
Figura 4.8 - Valores experimentais em função dos valores previstos para a coesão normalizada. ....	67
Figura 4.9 - Linhas de contorno para a coesão normalizada em função da tensão elétrica (V) aplicada e da concentração de sacarose (%). ....	68
Figura 4.10 - Elasticidade normalizada após 4 horas de DO.....	69

---

Figura 4.11 - Valores experimentais em função dos valores previstos para a elasticidade normalizada. ....	70
Figura 4.12 - Linhas de contorno para a elasticidade normalizada em função da tensão elétrica (V) aplicada e da concentração de sacarose (%). ....	71

---

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Números da produção de maçã no Brasil.....	6
Tabela 2.2 - Composição nutricional da maçã (em 100 g de polpa) .....	7
Tabela 3.1 - Planejamento fatorial com ponto central.....	31
Tabela 4.1 - Teor de umidade (g água por g sólidos secos) das amostras para os diferentes tratamentos .....	54
Tabela 4.2 - Dados experimentais do teor de umidade ajustados ao modelo de PELEG (1988) .....	56
Tabela 4.3 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre o teor de umidade no equilíbrio.....	56
Tabela 4.4 – Teor de umidade experimental e previsto no equilíbrio para todos os tratamentos. ....	57
Tabela 4.5 - Teor de sólidos solúveis (°Brix) determinado por refratômetro .....	60
Tabela 4.6 - Teor de sacarose (g de sacarose por 100 g de amostra) determinado pela análise de HPLC.....	60
Tabela 4.7 - Correlação entre o resultado da análise de incorporação de sólidos utilizando refratômetro e HPLC. ....	61
Tabela 4.8 - Dados experimentais do teor de sacarose ajustados ao modelo de PELEG (1988) .....	62
Tabela 4.9 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre o teor de sacarose no equilíbrio. ....	63
Tabela 4.10 - Teor de sacarose experimental e previsto no equilíbrio.....	64
Tabela 4.11 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a coesão normalizada.....	66
Tabela 4.12 - Coesão normalizada experimental e predita.....	67
Tabela 4.13 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a elasticidade normalizada. ....	69
Tabela 4.14 - Elasticidade normalizada experimental e predita.....	70

---

## Lista de Siglas, Abreviaturas e Símbolos

$a^*$	coordenada cromática – verde ao vermelho
<i>ABPM</i>	Associação Brasileira de Produtores de Maçã
$b^*$	coordenada cromática - azul ao amarelo
<i>Bi</i>	Número de Biot
<i>C</i>	concentração molar de A (mol s <sup>-1</sup> )
$C_{ab}^*$	cromaticidade (vivacidade da cor)
<i>d</i>	diâmetro (cm)
$D_{AB}$	difusividade mássica de A em B (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
<i>De</i>	difusividade mássica efetiva (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
<i>DO</i>	desidratação osmótica
$\Delta E^*$	variação total de cor sofrida pela amostra
<i>E</i>	erro médio
<i>Fo</i>	Número de Fourier
<i>h</i>	altura (cm)
$h_{ab}$	ângulo de tonalidade (localização da cor no plano cromático)
<i>in</i>	<i>in natura</i>
$k_1^w$ e $k_1^s$	parâmetros do Modelo de Peleg
$k_2^w$ e $k_2^s$	parâmetros do Modelo de Peleg
$k_c$	coeficiente convectivo de transferência de massa (m s <sup>-1</sup> )
<i>l</i>	metade da aresta do cubo (m)
$L^*$	parâmetro de cor - luminosidade
<i>M</i>	massa da amostra úmida (g)
<i>m/m</i>	massa/massa
$M_\infty$	quantidade de água perdida no equilíbrio (g)
<i>MEF</i>	<i>Moderate Electric Field</i> (Campo Elétrico Moderado)
<i>Ms</i>	massa da amostra seca (g)
<i>Mt</i>	quantidade de água perdida no tempo t (g)
$M_t^0$ e $M_0^0$	massa da amostra no tempo t e inicial (g)
<i>n</i>	número de observações
<i>p</i>	número de parâmetros
<i>PEF</i>	<i>Pulsed Electric Field</i> (Campo Elétrico Pulsado)
$R^2$	coeficiente de determinação
<i>RMSE</i>	erro quadrático médio
<i>SG</i>	<i>solid gain</i> (ganho de sólidos)
<i>t</i>	tempo (min) ou (s)
<i>WL</i>	<i>water loss</i> (perda de água)
<i>x, y e z</i>	coordenadas espaciais do sistema cartesiano
$x_1, x_2$	variáveis independentes
$x_{sac}$	teor de sacarose (g de sacarose por g de amostra)

---

$x_t^s$ e $x_0^s$	teor de sacarose no tempo t e inicial (g de sacarose por g de amostra)
$X_t^{ss}$ , $X_0^{ss}$	fração mássica de sólidos no tempo t e inicial
$x_t^w$ , $x_0^w$	teor de umidade no tempo t e inicial (g de água por g de sólidos secos)
$X_t^w$ , $X_0^w$	fração mássica de água no tempo t e inicial
$x_w$	teor de umidade (g de água por g de sólidos secos)
$x_\infty^w$ , $x_\infty^s$	concentração de equilíbrio da água e da sacarose
$y_i$	variável de resposta
$\alpha_{exp}$ , $\alpha_{predicted}$	resultados experimentais e previstos pelo modelo
$\beta_n$	coeficientes de regressão
$\chi^2$	chi quadrado



---

## Capítulo 1 – Introdução

A maçã (*Malus domestica*) é a segunda fruta fresca mais consumida no mundo, por ser considerada uma fruta de preço popular e possuir excelente sabor e qualidade. A produção brasileira de maçã concentra-se especialmente nos três estados da região Sul. O volume produzido, além de permitir o abastecimento do mercado interno com regularidade e qualidade, possibilita a exportação de parte significativa da produção.

A maçã é uma boa fonte de fibras, vitaminas B1 e B2, e sais minerais, como fósforo e potássio. A fruta contém um alto teor de pectina em sua casca, polissacarídeo que dificulta a absorção das gorduras, da glicose e elimina o colesterol. Ela também auxilia no bom funcionamento intestinal, além de ter uma ação benéfica para o coração.

O mercado consumidor é altamente exigente tanto para o preço quanto para a qualidade das frutas, o que acaba gerando um rejeito de aproximadamente 30% da produção nacional. As frutas que foram desqualificadas para o consumo *in natura* são normalmente direcionadas à industrialização, produzindo produtos como doces, geleias, sucos e vinagre.

Com o objetivo de reduzir as perdas dos frutos desqualificados para o consumo *in natura*, pode-se utilizar o processo de desidratação osmótica como uma alternativa tecnológica. A desidratação osmótica é um processo utilizado para produção de alimentos com umidades intermediárias ou como etapa de pré-tratamento em processos de secagem convencionais, como a liofilização, a secagem a vácuo e a secagem por ar.

Com o aumento da exigência dos consumidores por alimentos naturais e saudáveis, produtos à base de frutas devem ser processados de maneira a preservar as características sensoriais e, principalmente, suas propriedades funcionais. Técnicas de processamento que propiciam a redução de água livre sob condições brandas, como a desidratação osmótica, podem

ser uma alternativa viável para obtenção de produtos de alta qualidade e estáveis à deterioração química e microbiana.

A desidratação osmótica é uma operação de transferência de massa em que a água é parcialmente removida dos alimentos por imersão em soluções hipertônicas que possuem maior pressão osmótica e menor atividade de água. A estrutura celular dos alimentos pode ser considerada uma membrana semipermeável, e a diferença no potencial químico da água entre o alimento e o meio osmótico é a força motriz para a desidratação. Durante o processo, ocorrem dois fluxos simultâneos de transferência de massa em contracorrente: o fluxo de água do alimento para solução (perda de água) e o fluxo de soluto da solução para o alimento (ganho de sólidos).

Uma desvantagem do processo de desidratação osmótica é o longo tempo necessário para reduzir a atividade da água, o que dificulta a sua implementação em escala industrial. Com o objetivo de melhorar o desempenho da desidratação osmótica, aumentando a permeabilidade da membrana celular e a taxa de transferência de massa, essa técnica tem sido combinada com vários outros métodos. Entre eles pode-se citar o campo elétrico pulsado, o campo elétrico moderado, o ultrassom e a força centrífuga. Estas operações combinadas reduzem o tempo de processo e minimizam os custos com energia.

Sensoy e Sastry (2004b) definem o campo elétrico moderado como um processo caracterizado pelo uso de campos elétricos tipicamente de 1 a 1000 V cm<sup>-1</sup>, de formas de onda arbitrárias, com ou sem os efeitos de aquecimento ôhmico correspondentes. Dependendo da exposição elétrica e térmica relativa de um tratamento específico, é possível obter uma ampla variedade de efeitos em materiais biológicos. As células têm uma diferença de potencial natural através de suas membranas, e um campo elétrico externo aplicado tende a alterar essa diferença de potencial, levando à formação de poros reversíveis ou irreversíveis na membrana. Este fenômeno, denominado eletropermeabilização ou eletroporação, aumenta a permeabilidade da célula.

Portanto, a aplicação de campo elétrico moderado durante o processo de desidratação osmótica pode tornar o processo mais rápido e, portanto, ser uma opção quando se trata de preservação de alimentos em grande escala, pois ela pode promover aumento nas taxas de transferência de massa devido aos efeitos não térmicos da eletroporação e permeabilização das células do alimento.

---

Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo geral estudar os efeitos da utilização do campo elétrico moderado durante o processo de desidratação osmótica de maçã gala, avaliando a influência da eletroporação e da permeabilização das células nas taxas de transferência de massa de água e de soluto.

Objetivos específicos desse trabalho são:

- quantificar o teor de umidade e o teor de açúcares em função do tempo de imersão para diferentes tratamentos;
- investigar o efeito da concentração de sacarose da solução osmótica e do campo elétrico moderado aplicado sobre a transferência de massa da água e da sacarose;
- determinar a difusividade mássica efetiva da água e da sacarose, em diferentes concentrações de solução osmótica e campos elétricos moderados aplicados, a partir da sua estimativa utilizando a solução analítica da Segunda Lei de Fick;
- avaliar o efeito do campo elétrico na textura das amostras após 4 horas de tratamento;
- avaliar o efeito do campo elétrico na cor das amostras após 4 horas de tratamento;
- para o tratamento que fornecer a maior difusividade mássica efetiva de água quantificar o efeito do campo elétrico na capacidade redutora da amostra;
- para o tratamento que fornecer a maior difusividade mássica efetiva de água avaliar o efeito do campo elétrico nas mudanças estruturais da amostra.

O presente texto está estruturado da forma descrita a seguir. O Capítulo 2 apresenta uma revisão sobre os principais aspectos relacionados à maçã, além de uma fundamentação e revisão sobre a textura dos alimentos. Neste capítulo também são abordados temas relacionados ao processo de desidratação osmótica, à difusividade mássica efetiva e ao Modelo de Peleg. Além disso, é apresentada uma fundamentação teórica e revisão de trabalhos publicados sobre o campo elétrico moderado e sua aplicação associada à desidratação osmótica.

O Capítulo 3 apresenta detalhadamente a metodologia experimental utilizada nos ensaios e nas determinações analíticas realizadas durante a realização do estudo.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho e a discussão dos mesmos, sendo estes divididos em duas partes, na forma de um artigo e de resultados complementares.

Para finalizar, os Capítulos 5 e 6 se destinam à apresentação das principais conclusões e algumas sugestões para a execução de trabalhos futuros, respectivamente.

---

## Capítulo 2 - Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo são apresentados os fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica dos aspectos gerais da maçã, sua composição nutricional e seus compostos fenólicos. Além disso, é realizada uma fundamentação e revisão sobre a textura dos alimentos. Posteriormente, são abordados o processo de desidratação osmótica, a difusividade mássica efetiva e o Modelo de Peleg. Finalmente, estão descritos o campo elétrico moderado e sua aplicação associada à desidratação osmótica.

### 2.1 Maçã

#### 2.1.1 Aspectos Gerais

A macieira é um híbrido complexo cujo nome científico é *Malus domestica*, sendo que sua origem ainda é motivo de controvérsia entre os pesquisadores. A hipótese mais aceita na atualidade é que ela seja derivada da *Malus sieversii*, forma silvestre originária da Ásia Central e do Cáucaso, em regiões com altitudes entre 1.200 e 1.800 m (TOBERGTE; CURTIS, 2013).

A maçã é um fruto globoso com uma profunda depressão no ponto de inserção da haste, que o prende aos ramos, de coloração vermelha ou verde e podendo apresentar pequenas manchas esverdeadas ou amareladas. A planta é uma frutífera típica de clima temperado, com pequena exigência de frio, produzindo satisfatoriamente em condições de inverno brando. A árvore chega a 10 metros de altura, com tronco de casca parda, lisa e copa arredondada. Suas flores são aromáticas com coloração branca ou rósea (ABPM, 2016).

A macieira foi introduzida no Brasil pelos primeiros colonizadores europeus. Dessa época até o início da década de 1960 era cultivada principalmente em pomares domésticos, com exceção da região de Valinhos (SP), onde existiam pomares comerciais. O Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), em São Paulo, deu o passo inicial para a pesquisa em macieira

---

no Brasil, introduzindo 72 cultivares de macieiras. Em 1969, no município do Fraiburgo (SC), registros indicam a existência do primeiro plantio comercial no estado de Santa Catarina (TOBERGTE; CURTIS, 2013 e KIST, 2015).

No início da década de 1970, o Brasil ocupava o primeiro lugar no ranking de importação de maçãs no hemisfério Sul, e quinto no mundial. A crise do petróleo, que se agravou na época, levou o governo brasileiro a criar uma política de incentivos fiscais e de crédito para aumentar a produção brasileira de itens de peso na pauta de importações. A maçã foi escolhida por representar um volume de 200 mil toneladas e um dispêndio de divisas de 100 milhões de dólares por ano (NACHTIGALL, 2004). Assim, outras áreas passaram a ganhar espaço comercial, como ocorreu em Vacaria (RS) e São Joaquim (SC). O polo gaúcho de Vacaria tornou-se realidade em vista da sua topografia, da altitude e do clima adequados para pomares de grande porte (KIST, 2018).

A maçã é consumida majoritariamente *in natura*, porém diversos tipos de processamento da fruta são possíveis, produzindo produtos como doces, geleias, compotas, sucos, bebidas e vinagre. No Brasil, a capacidade de armazenamento de maçãs é de cerca de 60% da produção nacional, com boa parte dessa capacidade instalada em Santa Catarina. O mercado consumidor é altamente exigente com relação ao preço e à qualidade das frutas, o que demanda um beneficiamento capaz de selecionar criteriosamente as frutas com potencial de mercado *in natura*, ocasionando um descarte em torno de 30% da produção nacional. Esse descarte é normalmente direcionado à industrialização, que tem apresentado uma tendência de aumento (SEBRAE NACIONAL, 2018).

Em função do grande volume de produção e, conseqüentemente, da grande quantidade de maçãs a serem descartadas, novos produtos foram surgindo; dentre eles, pode-se destacar a maçã desidratada, que possui boa aceitação no mercado, por ter seu peso e volume reduzidos, pela praticidade de consumo e transporte e, também, por sua aplicabilidade; ela pode ser utilizada pela indústria de processamento de alimentos para a formulação de novos produtos, que incluem a fruta desidratada como ingrediente (VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012)

Segundo Kist (2018), as maçãs produzidas no Brasil em 2018 apresentaram redução no tamanho da fruta, mas o sabor único que agrada os consumidores não sofreu alterações. Ainda que não esteja disponível nenhum número oficial, a Associação Brasileira de Produtores de Maçã (ABPM) estimou a safra entre 1 milhão e 1,1 milhão de toneladas. A Tabela 2.1 mostra os números da produção de maçãs no Brasil nos últimos 4 anos.

Tabela 2.1 - Números da produção de maçã no Brasil

Safra	Área Colhida (ha)	Produção (ton)
2015/16	33.981	1.049.251
2016/17	33.244	1.24.614
2017/18*	-	1.000.000 - 1.100.000
Principais estados produtores 2016/17 (ton)		
Santa Catarina		638.351
Rio Grande do Sul		577.774
Paraná		29.700

\* Estimativa

Fonte: (KIST, 2018)

Embora existam milhares de cultivares no mercado internacional, atualmente são agricultadas aproximadamente 100 diferentes cultivares. Mais da metade da produção mundial utiliza apenas quatro cultivares: Delicious, Golden Delicious, Gala, Fuji e seus respectivos sub-clones ou mutações espontâneas (BERNARDI; DENARDI; HOFFMANN, 2005).

As cultivares mais plantadas no Brasil são Gala (46%), Fuji (45%), Golden Delicious (6%) e outras (3%). Os cultivares são classificados em precoces, semi-precoces, de meia-estação e tardias. O cultivar Gala se classifica como precoce e tem sua colheita no mês de janeiro (FREIRE *et al.*, 2007 e NACHTIGALL, 2004).

A cultivar Gala, apresentada na Figura 2.1, é originária da Nova Zelândia, sendo considerada de média exigência em frio e bastante produtiva. Os frutos são bastante crocantes e suculentos, possuem película vermelho-estriada, pouca acidez e sabor adocicado (FREIRE *et al.*, 2007).



Figura 2.1 - Maçã Gala

Fonte: Bernardi, Denardi e Hoffmann, (2005)

### 2.1.2 Composição Nutricional

O principal componente presente na maçã é a água, representado aproximadamente 83% de sua composição, conforme apresentado na Tabela 2.2. Porém, sua composição química é altamente influenciada pelo grau de maturação, técnicas culturais, época da colheita e condições de armazenamento (SANTOS, 2009). Segundo Duarte (2012) e Córdova (2006), o segundo componente principal da maçã é o carboidrato, sendo que aproximadamente 75% dos carboidratos são constituídos por açúcares facilmente assimilados pelo homem, compostos principalmente por frutose (5%), seguido da glicose (2,6%) e da sacarose (1,7%).

Tabela 2.2 - Composição nutricional da maçã (em 100 g de polpa)

Umidade (%)	82,60
Proteína (g)	0,20
Lipídeos (g)	0,20
Colesterol (mg)	NA
Carboidrato (g)	16,60
Fibra Alimentar (g)	2,00
Cinzas (g)	0,30
Cálcio (mg)	3,00
Magnésio (mg)	5,00
Manganês (mg)	0,01
Fósforo (mg)	11,00
Ferro (mg)	0,10
Sódio (mg)	1,00
Potássio (mg)	117,00
Cobre (mg)	0,03
Vitamina C	1,50
Valor energético (kcal)	63,00

Fonte: TACO, 2011

A composição nutricional da maçã merece destaque, principalmente pelo seu alto valor de vitaminas (B, C e E) e minerais, como o potássio e o fósforo, além de substâncias antioxidantes e fitonutrientes. As vitaminas do Complexo B ajudam a regular o sistema nervoso, o crescimento, evitam problemas de pele, do aparelho digestivo e queda dos cabelos. O fósforo previne a fadiga mental, além de contribuir para a formação de ossos e dentes. Além disso, sua composição de fibras, composta principalmente por pectina, ajuda a reduzir o nível de colesterol e controla a glicemia (TOGNON, 2012; FELICIANO, [s.d.]; ABPM, 2016).

Estudos científicos mostram que os componentes presentes na maçã auxiliam na prevenção de doenças e outros problemas. Atuam, por exemplo, no fortalecimento do sistema imunológico e dos ossos, desintoxicação do corpo e regulação do intestino. Assim, contribuem

para evitar e prevenir desde problemas dentários, Alzheimer, Parkinson, osteoporose, até alguns tipos de câncer e complicações cardiovasculares (KIST, 2018).

Outros componentes presentes na maçã são os compostos fenólicos, que são de suma importância pois contribuem de forma significativa para a cor, sabor e aroma da fruta e dos seus derivados. Além disso, suas propriedades biológicas, tais como atividade anti-inflamatória, antitumoral, habilidade de captura de radicais livres e de proteção contra doenças cardíacas, têm sido objeto de grande interesse (PENG *et al.*, 2005).

### 2.1.3 Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos são substâncias químicas que possuem, no mínimo, uma hidroxila diretamente ligada a um anel aromático (Figura 2.2), incluindo seus derivados funcionais, o que os torna diferentes na estrutura química e reatividade. Podem ser pigmentos ou produtos originados do metabolismo secundário das plantas, sendo essenciais para o seu crescimento e reprodução, formando-se em condições de estresse, como infecções, ferimentos, exposição a radiações UV e outras agressões do ambiente. Eles são oxidados por enzimas vegetais específicas e por influência de metais, luz, calor ou em meio alcalino, ocasionando o escurecimento de soluções ou compostos isolados. Alguns compostos são solúveis apenas em solventes orgânicos; outros, como é o caso das formas glicosadas, são solúveis em água, sendo que existem, ainda, as cadeias poliméricas, que são totalmente insolúveis (DEY; HARBORNE; BONNER, 1997; PRADO, 2009). Os compostos fenólicos estão presentes nos vegetais na forma livre ou ligados a açúcares (glicosídeos) e proteínas, ou seja, possuem estrutura variável (NACZK; SHAHIDI, 2004).

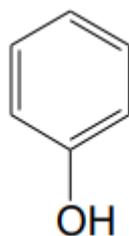


Figura 2.2 - Estrutura química básica dos compostos fenólicos  
Fonte: Shahidi; Naczk; (1995)

O teor dos compostos fenólicos presentes em frutos depende da cultivar e do tipo de manejo realizado sobre o solo (GIL *et al.*, 2002; MARTINS *et al.*, 2004). A maçã é uma fruta que constitui uma das principais fontes de compostos fenólicos na dieta ocidental. A atividade

---

antioxidante dos compostos fenólicos da maçã está entre os mais altos teores em frutas e vegetais comumente consumidos, sendo importantes por causa da sua contribuição para a qualidade sensorial dos alimentos *in natura* e das frutas processadas; também são reconhecidos por suas propriedades antioxidantes e manutenção da saúde (BOYER; LIU, 2004; VAN DER SLUIS *et al.*, 2002; WON *et al.*, 2003). As principais classes de compostos fenólicos encontrados em maçãs são os ácidos fenólicos e os flavonoides. Os ácidos fenólicos são representados pelos ácidos hidroxicinâmicos e hidroxibenzóicos, e os flavonoides, representados por flavan-3-óis (epicatequina, catequina e procianidinas), antocianinas, flavonóis (quercetina) e dihidrochalconas (floreína e floridzina) (AWAD; DE JAGER; VAN WESTING, 1999; TSAO *et al.*, 2005; VANZANI *et al.*, 2005).

## 2.2 Textura

Qualidade e aparência dos alimentos são atributos importantes para o consumidor, sendo os mais importantes a cor, a textura e o sabor, além de propriedades físicas, como tamanho e forma. Todos esses atributos em alimentos podem ser avaliados por meio de um painel sensorial treinado; no entanto, a caracterização mais rápida e objetiva é obtida por meio de medições instrumentais, porque reduz as variações de julgamento entre os indivíduos e pode fornecer uma linguagem comum entre pesquisadores, indústria e consumidores. Neste contexto, segundo Abbott (1999), textura e sabor parecem ser as características mais importantes para o consumidor.

A textura é definida como: “fatores mecânicos, geométricos e de superfície de um produto, perceptíveis por intermédio de receptores mecânicos, táteis e, quando apropriados, visuais e auditivos”. Existem diversas abordagens para as medições instrumentais de textura, entre elas a Análise do Perfil de Textura (TPA), que simula ou imita as condições a que os alimentos são sujeitos na boca (DUARTE, 2012).

A TPA foi desenvolvida há alguns anos e adaptada a um texturômetro universal, fornecendo um meio útil de analisar uma série de parâmetros texturais em um único teste por meio de uma dupla compressão da amostra (BOURNE; M. C., 1968; FRIEDMAN; WHITNEY; SZCZESNIAK, 1963). Bourne e Comstock (1981) realizaram um TPA em maçã, cenoura, salsicha, cream cheese e pretzels usando um texturômetro Instron, e o efeito do grau de compressão nos parâmetros de TPA foi medido a uma taxa fixa de deformação

A medição da TPA determina a dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade dos alimentos. A dureza é a força necessária para promover uma deformação ou penetração no alimento, sendo que na boca é percebida pela compressão do produto entre os dentes. A coesividade é a força das ligações internas que constituem o alimento e é medida pelo grau de deformação antes de quebrar. A elasticidade é a rapidez com que o alimento se recupera de uma força de deformação, indicando sensorialmente a intensidade da sensação elástica que o alimento causa na boca. A mastigabilidade é a energia requerida para mastigar um alimento até que este esteja apto a ser engolido (ROSENTHAL, 1999).

A Figura 2.3 mostra uma curva típica de força-tempo a partir de um teste de TPA. A dureza é definida pela força máxima durante o primeiro ciclo de compressão. A coesividade é calculada como a razão da área do segundo ciclo pela área do primeiro ciclo. A elasticidade é determinada pela razão entre a altura do segundo ciclo e a altura do primeiro ciclo. A fragilidade é definida pela distância que a sonda percorre até atingir o primeiro pico no primeiro ciclo (KHIN; ZHOU; YEO, 2006).

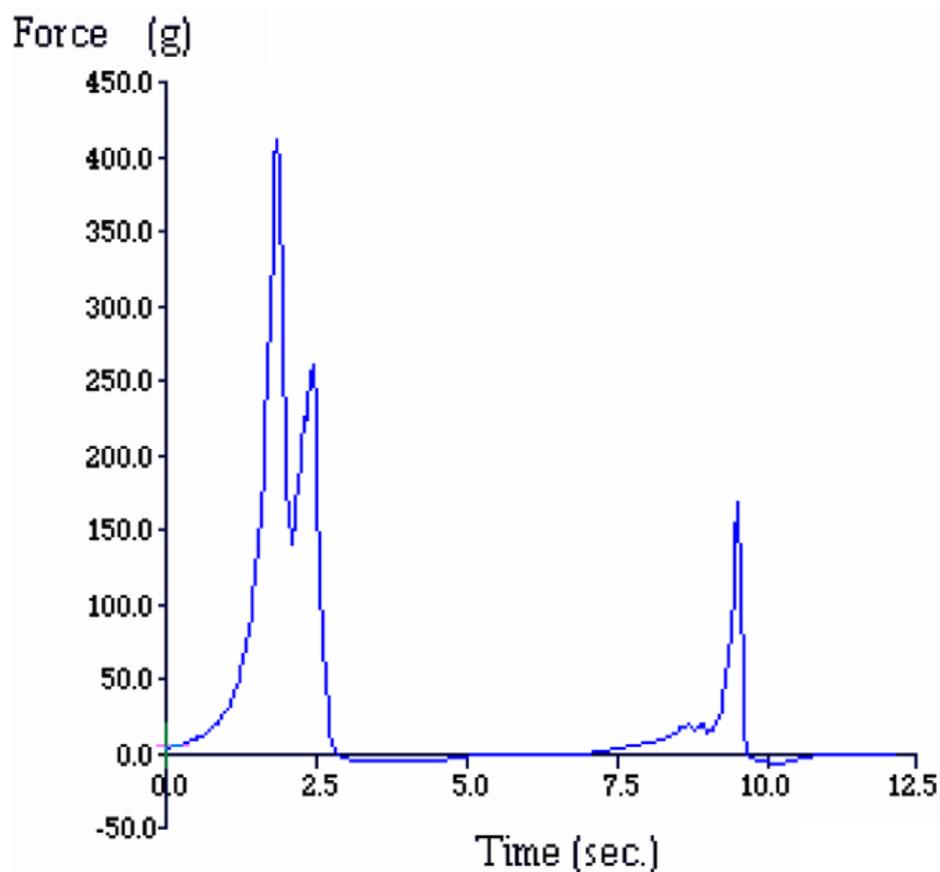


Figura 2.3 - TPA típica para cubos de maçã  
Fonte: Khin; Zhou; Yeo, (2007)

### 2.3 Desidratação Osmótica

Os alimentos osmoticamente desidratados são produtos de umidade intermediária, com menor atividade de água que o produto *in natura*, que é conferida pelo ganho de soluto e perda de água. O principal objetivo da desidratação osmótica (DO) é fornecer estabilidade ao produto. Durante o processo, as atividades químicas, físicas e biológicas, que deterioram os alimentos, são reduzidas consideravelmente, prolongando, assim, a vida útil dos produtos alimentícios. Além disso, a DO é um processo que demanda menor quantidade de energia quando comparada com outras técnicas de secagem. Os produtos osmoticamente desidratados podem ser usados em laticínios, indústrias de doces e panificação, além de serem empregados na produção de concentrados e doces de frutas (GARCÍA-MARTÍNEZ *et al.*, 2002; KHAN, 2012).

A DO também tem sido amplamente utilizada como etapa de pré-tratamento no processo de secagem de alimentos, uma vez que reduz a necessidade global de energia para o processo de secagem, ocasionado pelo menor tempo de secagem. Além disso, promove melhora na qualidade do produto final, pois diminui os danos causados pelo calor, principalmente no sabor e na cor dos alimentos, acarretando na redução da perda de nutrientes, como vitaminas e minerais (EL-AOUAR; AZOUBEL; MURR, 2003; KHAN, 2012; KHIN; ZHOU; PERERA, 2006)

A DO, ou alternativamente denominada impregnação ou saturação, é uma importante operação para transformar os alimentos perecíveis de origem vegetal ou animal em novos produtos. A DO é um processo de remoção parcial da água dos alimentos através da imersão em solução hipertônica de um ou mais solutos. Durante o processo, ocorrem dois processos simultâneos de transferência de massa em contracorrente: a água é removida do interior dos alimentos para a solução hipertônica, e o soluto é transferido da solução osmótica para o alimento (LENART, 1996; RAOULT-WACK, 1994; RASTOGI; RAGHAVARAO; NIRANJAN, 2014). Uma representação esquemática desses dois processos está indicada na Figura 2.4, que também mostra um terceiro processo, que ocorre em menor escala, da transferência de outros solutos do alimento para a solução osmótica.

A remoção de água está baseada no fenômeno natural e não destrutivo de osmose através das membranas celulares. A força motriz responsável pela saída de água é a diferença de pressão osmótica entre o produto e a solução. Porém, no caso da incorporação dos solutos, a força motriz é a diferença de concentração do soluto existente entre o alimento e a solução osmótica.

Devido à semi-permeabilidade da membrana celular, os solutos naturais do alimento, como por exemplo, ácidos orgânicos, minerais e corantes movem-se para a solução hipertônica a partir dos materiais alimentares. Esta transferência é quantitativamente desprezível mas essencial em termos de composição do produto, no que diz respeito às características sensoriais e nutricionais (PHISUT, 2012; RASTOGI; RAGHAVARAO, 2004; TORTOE, 2010).

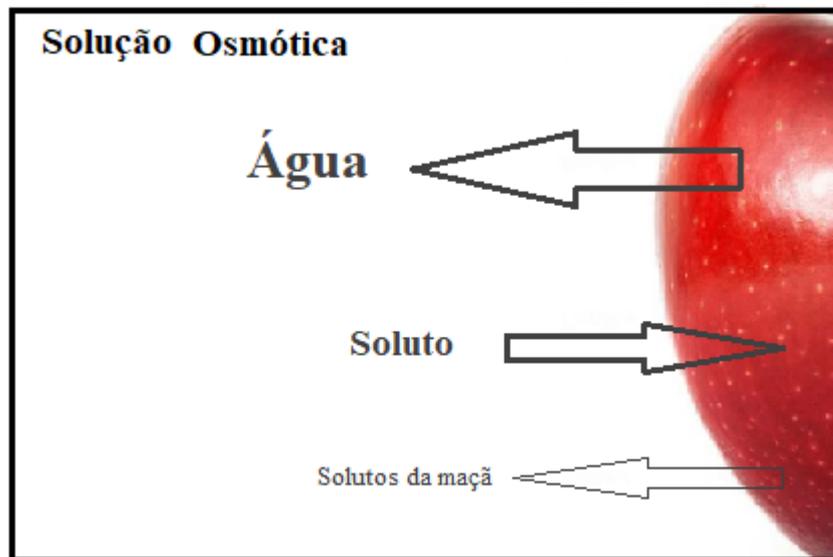


Figura 2.4 - Representação esquemática dos processos de transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica.

A taxa de transferência de massa durante a DO é influenciada por vários fatores, tais como tipo de agente osmótico, concentração e temperatura da solução osmótica, tamanho e geometria do alimento, proporção solução/alimento utilizada e agitação da solução. Aumentos na concentração e temperatura da solução osmótica, aumentam a transferência de massa; no entanto, temperaturas elevadas causam alterações indesejáveis no sabor, cor e textura dos produtos. Na literatura existem relatos de escurecimento enzimático e deterioração do sabor acima de 49 °C. Para desidratação de frutas e legumes, o agente osmótico mais utilizado é a sacarose em diferentes concentrações ( AHMED; QAZI; JAMAL, 2016a; LERICI *et al.*, 1985; TORREGGIANI, 1993).

Os principais benefícios do processo de DO nos alimentos incluem a manutenção das características de qualidade do alimento, eficiência energética, redução dos custos com embalagens e distribuição e estabilidade do produto durante o armazenamento (YETENAYET; HOSAHALLI, 2010). Além disso, caso os solutos sejam selecionados apropriadamente, o processo ainda pode melhorar a retenção de cor e sabor e fornecer texturas mais suaves para os

---

produtos vegetais e de frutas, mantendo, assim, a proporção equilibrada de impregnação e remoção de água (TORTOE, 2010).

A utilização do processo de DO apresenta algumas desvantagens, podendo-se destacar o problema da destinação para a solução osmótica utilizada, já que o constituinte dessa foi alterado em função da absorção de soluto e saída de água do alimento, tornando-se, desta forma, um resíduo para a indústria (TORTOE, 2010). Segundo Raoult-Wack (1994b), também pode ser citado a absorção de soluto e a lixiviação de constituintes dos alimentos que resultam em alteração substancial da composição original do produto com influência negativa no perfil nutricional e atributos sensoriais.

### 2.3.1 Difusividade Mássica Efetiva

Em muitas aplicações na engenharia de alimentos, a transferência de calor é acompanhada por transferência de massa de água ou nutrientes. Secagem ao ar, liofilização, secagem por pulverização e secagem a vapor são bons exemplos de processos dependentes da difusão mássica em alimentos. A difusão de água e nutrientes pode ocorrer independentemente da transferência de calor em processos como a desidratação osmótica, separação de membranas, absorção e adsorção (KUTZ, 2013).

Nos fenômenos difusivos relacionados ao processamento de alimentos, o gradiente de concentração é geralmente dependente do tempo, e a difusão mássica pode ser representada pela Segunda lei de Fick para estado transiente, onde o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração dentro do sólido (VARZAKAS *et al.*, 2005).

Para uma transferência de massa multidirecional, num sistema cartesiano, a Segunda Lei de Fick para estado transiente é apresentada pela Equação 2.1:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

onde  $t$  é o tempo,  $C$  é a concentração molar do componente A,  $D_{AB}$  é a difusividade mássica de A em B e  $x$ ,  $y$  e  $z$  são coordenadas espaciais do sistema cartesiano. Esta equação é válida para meios isotrópicos cuja estrutura e propriedades de difusão em qualquer ponto são as mesmas em todas as direções.

Em processos alimentícios, especialmente processos de secagem e extração sólido-líquido, a difusão de fluidos em sólidos porosos é bastante importante. Assim, define-se a difusividade mássica efetiva como uma quantidade empírica e não uma propriedade física precisamente determinada. Essa variável é muito difícil de ser predita, mas medidas são possíveis, e elas indicam uma dependência com a temperatura, pressão e a geometria dos poros (SMITH, 2011).

Existem diversos métodos descritos na literatura para estimação de difusividades mássicas efetivas em sólidos baseados na solução da Segunda Lei de Fick, aplicada a condições de contorno e suposições apropriadas. Crank (1975) apresenta várias expressões matemáticas das soluções analíticas em diferentes geometrias e diferentes condições de contorno e condição inicial.

No presente trabalho, o processo de desidratação osmótica foi realizado em cubos de maçã e, desta forma, a geometria em análise corresponde à combinação de três placas planas idênticas, para as seguintes condição inicial e condições de contorno:

- para  $t = 0$ ,  $-l < x < l$ ,  $C = C_0$ , distribuição inicial de umidade/sacarose na amostra uniforme;
- para  $t > 0$ , em  $x = l$ ,  $C = C_1$ , condição de concentração especificada na superfície;
- para  $t > 0$ , em  $x = 0$ ,  $dC/dt = 0$ , simetria da concentração.

No tempo  $t = 0$ , tem-se uma concentração inicial constante  $C_0$ ; na superfície do cubo ( $x = l$ ) tem-se uma condição de concentração especificada  $C_1$  (esta condição é alcançada graças ao alto coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c \rightarrow \infty$ ), fornecendo um número de Biot mássico,  $Bi_m$ , infinito obtido devido à manutenção de uma agitação intensa e constante); no centro do cubo tem-se a condição de simetria.

De acordo com Crank (1975), a solução da segunda Lei de Fick para o formato cúbico é o produto da solução de três placas planas idênticas, conforme a Equação 2.2:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left\{ -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{F_0}{4} \right\} \right]^3 \quad (2.2)$$

onde  $M_t$  é a quantidade de água perdida no tempo  $t$  e  $M_\infty$  é a quantidade de água perdida quando o sistema atinge a condição de equilíbrio;  $F_o$  é o número de Fourier mássico, definido pela Equação 2.3:

$$F_o = \frac{D_e t}{l^2} \quad (2.3)$$

onde  $D_e$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) é a difusividade mássica efetiva,  $l$  (m) é a metade da dimensão da placa (metade da aresta do cubo) e  $t$  (s) é o tempo de imersão.

### 2.3.2 Modelo de Peleg

O processo de desidratação osmótica é intrinsicamente um processo lento, uma vez que está baseado na difusão de massa através de um sólido. Esse processo demanda várias horas de processamento para atingir o equilíbrio e, em alguns casos, não é possível alcançá-lo devido à instabilidade biológica e/ou física do produto a ser desidratado. Peleg (1988) propôs um modelo de dois parâmetros que descreve curvas de adsorção e testou sua precisão durante a adsorção de água em leite em pó e em grãos de arroz. Essas curvas relacionam o conteúdo de umidade em função do tempo e permitem a estimativa do teor de umidade após longos tempos de exposição a partir de dados experimentais para tempos relativamente curtos. Este modelo, representado através das Equações 2.4 e 2.5, tem sido utilizado para modelar curvas de sorção de diferentes alimentos e taxas de desidratação de frutas e vegetais osmoticamente desidratados (BROCHIER, 2013; KHIN; ZHOU; PERERA, 2006; MERCALI *et al.*, 2011).

$$x_t^w - x_0^w = -\frac{t}{k_1^w + k_2^w t} \quad (2.4)$$

$$x_t^s - x_0^s = \frac{t}{k_1^s + k_2^s t} \quad (2.5)$$

onde  $x_t^w$  e  $x_0^w$  são o teor de umidade de uma amostra no tempo  $t$  de desidratação e no início, respectivamente.  $x_t^s$  e  $x_0^s$  são o teor de sacarose na amostra no tempo  $t$  de desidratação e no início, respectivamente.  $k_1^w$ ,  $k_1^s$ ,  $k_2^w$  e  $k_2^s$  são parâmetros do modelo. As constantes  $k_1^w$  e  $k_1^s$  estão relacionadas com a taxa inicial de transferência de água e de soluto ( $N_0^w$  e  $N_0^s$ ) através das Equações 2.6 e 2.7:

$$N_0^w = \frac{dx^w}{dt} = \left| \frac{1}{k_1^w} \right| \quad (2.6)$$

$$N_0^s = \frac{dx^s}{dt} = \left| \frac{1}{k_1^s} \right| \quad (2.7)$$

As constantes  $k_2^w$  e  $k_2^s$  estão relacionadas com as concentrações de água e de soluto no alimento nas condições de equilíbrio através das Equações 2.8 e 2.9:

$$x_\infty^w = x_0^w - \frac{1}{k_2^w} \quad (2.8)$$

$$x_\infty^s = x_0^s + \frac{t}{k_2^s t} \quad (2.9)$$

onde  $x_\infty^w$  e  $x_\infty^s$  são as concentrações de equilíbrio da água e do soluto, respectivamente.

## 2.4 Campo Elétrico Moderado

O Campo Elétrico Moderado (MEF, do inglês *Moderate Electric Field*) é um processo caracterizado pela utilização de campo elétrico de intensidade variando de 1 a 1000 V.cm<sup>-1</sup> com forma de onda arbitrável, com ou sem os efeitos de aquecimento ôhmico. Através da sua aplicação, é possível obter uma ampla variedade de efeitos em materiais biológicos, que dependem da tensão elétrica e da exposição térmica a que o produto foi exposto (SENSOY; SASTRY, 2004). De acordo com Sastry (2008), os processamentos com a utilização do MEF emergiram a partir do reconhecimento de que a utilização de campos elétricos relativamente suaves causa efeitos significativos sobre os alimentos e materiais biológicos.

A aplicação de MEF resulta na geração de calor, devido ao efeito Joule. Entretanto, existem efeitos associados ao campo elétrico que não são provenientes da geração de calor e podem aumentar a transferência de massa de componentes intracelulares. Esses efeitos são chamados de efeitos não-térmicos e estão associados ao fenômeno de eletroporação e permeabilização das células (SOMAVAT; MOHAMED; SASTRY, 2013; VOROBIEV; LEOVKA, 2008).

De acordo com Coster (1965), as células têm um diferença de potencial natural através de suas membranas. A exposição das células a um campo elétrico irá promover o acúmulo de cargas elétricas na membrana celular, induzindo, assim, o aumento da diferença de potencial

---

químico. Ao atingir-se uma diferença de potencial suficientemente alta (de 0,2 a 1 V), ocorre um rearranjo das moléculas de fosfolípídeos e se alcança o potencial de colapso, fazendo com que a membrana perca sua seletividade e se torne permeável. Esse fenômeno é conhecido como eletroporação, eletropermeabilização ou eletroplasmólise. Dessa forma, o fenômeno de eletroporação tem sido conhecido por induzir a formação de poros em membranas celulares, aumentando a transferência de massa de componentes internos para o meio externo, bem como de componentes presentes no meio externo para o interior da célula (JEMAI; VOROBIEV, 2002; KUSNADI; SASSTRY, 2012).

Vários modelos teóricos foram desenvolvidos para descrever a eletroporação em nível microscópico, destacando-se as teorias de instabilidades eletromecânicas, eletrohidrodinâmicas, eletrosmóticas e visco-elásticas. No entanto, o mecanismo de eletroporação ainda não está totalmente compreendido, uma vez que há discrepâncias entre os resultados teóricos e experimentais, devido, em parte devido à alta complexidade das membranas biológicas (BARBOSA-CÁNOVAS; TAPIA; CANO, 2005).

A eletroporação pode ocorrer de maneira reversível ou irreversível, conforme apresentado na Figura 2.5. Quando a diferença de potencial transmembrana é mantida abaixo do potencial de colapso ocorre a eletroporação reversível. Neste caso, os poros são formados temporariamente e mantidos apenas durante a aplicação de campo elétrico. Porém, quando a diferença de potencial transmembrana atinge o potencial de colapso, ocorre a formação permanente de poros, resultando na desintegração da membrana e morte celular (VOROBIEV; LEBOVKA, 2008).

O fenômeno de eletroporação é dividido em diferentes fases: a primeira é a formação de poros na membrana celular, em resposta à diferença de potencial induzido, com duração de alguns microssegundos; a segunda fase é a expansão dos poros formados, que pode durar de microssegundos a milissegundos, dependendo da duração da aplicação da diferença de potencial; a última fase é a recuperação da membrana celular e se inicia com o término da aplicação de campo elétrico, podendo ter duração de minutos. Os fenômenos de formação de poros e recuperação da membrana celular ocorrem mais rapidamente a temperaturas elevadas. A difusão através dos poros pode levar minutos a 35 °C e até horas se o processo for mantido a 4 °C (VOROBIEV; LEBOVKA; CHEMAT, 2011).

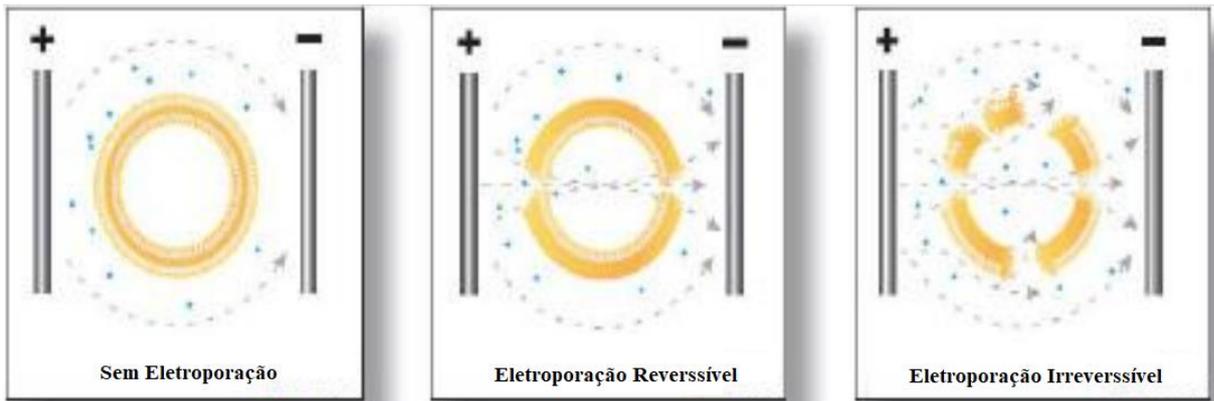


Figura 2.5 - Representação da eletroporação reversível e irreversível.

Fonte: Meijerink, (2015)

A eletroporação, e o conseqüente aumento da permeabilidade da membrana celular pode ser utilizado para o aumento da transferência de massa em processos como secagem, extração e fermentação. A secagem e a extração são melhoradas pois a aplicação de MEF facilita o transporte de materiais para fora das células a partir do tecido de células intactas, como frutas e vegetais crus. (VICENTE *et al.*, 2012; VOROBIEV; LBOVKA; CHEMAT, 2011). Zhong e Lima (2003) obtiveram uma diminuição de 24% no tempo de secagem utilizando aquecimento ôhmico (50 V / cm, 45 °C) como pré-tratamento para secagem à vácuo de batata doce. Lebovka, Shynkaryk e Vorobiev, (2006) observaram um aumento na taxa de secagem e da difusividade da umidade do tecido da batata com um aumento na intensidade do campo elétrico, mostrando que o aquecimento ôhmico pode causar danos ao tecido da batata através do mecanismo de eletroporação.

Kusnadi e Sastry (2012b) avaliaram o efeito do MEF na difusão do sal em três tecidos vegetais através da determinação da difusividade mássica efetiva para diferentes temperaturas e intensidades de campos elétricos. Os resultados mostraram que a difusividade aumentou com o aumento da temperatura e da intensidade do campo elétrico para todos os materiais (aipo, cogumelo e castanha d'água), evidenciando um aumento no transporte de íons ao longo do tempo.

Kulshrestha e Sastry (2003) mediram a difusão do corante de cubos de beterraba de durante o processo de MEF usando frequências variando de 0 (corrente contínua) a 5000 Hz, e intensidades de campo elétrico variando de 0 (aquecimento convencional) a 23,9 V cm<sup>-1</sup>, mantendo a temperatura em 45 °C. A difusão aumentou com o aumento do campo elétrico e diminuiu com frequência. A eletroporação foi sugerida como o mecanismo responsável pelo acréscimo da difusão. Os autores também destacaram a relevância industrial do estudo,

---

constatando que a melhoria da transferência de massa influencia em inúmeras aplicações potenciais do processamento de alimentos.

Kulshrestha e Sastry (2009) estudaram a permeabilização de células de beterraba e batata ao longo do tempo utilizando MEF a baixas frequências. Esses autores concluíram que, mesmo com a aplicação de baixas tensões, ocorreu um aumento na difusão. Portanto, os tratamentos com baixa energia podem ser utilizados para aumentar a difusão de compostos do interior das células.

## **2.5 Desidratação Osmótica Associada ao Campo Elétrico Moderado**

Recentemente, a DO foi combinada com vários outros métodos, entre eles, campo elétrico de alta pulsação, alta pressão hidrostática, ultrassom, força centrífuga, vácuo e irradiação gama. Estas técnicas foram empregadas durante ou após o tratamento osmótico como o objetivo de melhorar o desempenho da desidratação osmótica, aumentando, assim, a permeabilidade da membrana celular e a taxa de transferência de massa. Essas operações combinadas reduzem o tempo de secagem, minimizando os custos adicionais de energia e melhoram a qualidade das frutas e vegetais durante o armazenamento (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016).

Com o objetivo de melhorar o desempenho da DO, Allali, Marchal e Vorobiev (2009) avaliaram o efeito do branqueamento por aquecimento ôhmico (OH) nos tecidos da maçã e na cinética da desidratação osmótica subsequente. Os resultados indicaram que o aquecimento ôhmico, mesmo para tratamentos curtos, causou mudanças significativas na estrutura celular das maçãs e aumentou a transferência de massa (perda de água e ganho de açúcar) durante a desidratação osmótica. Segundo os autores, isso ocorreu pela capacidade do aquecimento ôhmico de permeabilizar eficientemente as membranas celulares e causar modificações significativas na estrutura do fruto.

Moreno *et al.*, (2011a) estudaram a influência do vácuo pulsado (PVOD) e do aquecimento ôhmico (OH) na cinética de DO e na estrutura das maçãs. O objetivo da pesquisa foi determinar a resposta das amostras de maçã à DO usando tratamentos combinados de PVOD e OH, através da determinação e observação da transferência de massa e microestrutura de maçãs desidratadas osmoticamente. Em vários tratamentos com OH, a redução do tempo atingiu 50% em relação ao tratamento convencional. Os autores concluíram que o processo de DO com aplicação de PVOD e OH afetou significativamente a cinética de perda de água e ganho de

sólidos, favorecendo, desta forma, a transferência de massa. Além disso, constataram que a DO e o OH induziram mudanças estruturais, incluindo mudanças na forma, na redução do tamanho da célula, na diminuição da espessura da lamela média e na ruptura celular. Estas alterações foram causadas pelo efeito elétrico dos tratamentos.

Simpson *et al.* (2015) determinaram os mecanismos de difusão em maçãs *Granny Smith* submetidas a MEF, com campo elétrico variando de 0 a 17 V cm<sup>-1</sup>. A DO foi realizada a 40 °C tanto para o tratamento convencional quanto para o MEF. A solução osmótica foi exposta a campos elétricos de 0, 9, 13 ou 17 V cm<sup>-1</sup>. Para determinar os mecanismos de difusão, dois modelos fenomenológicos foram utilizados: segunda lei de Fick e modelo de difusão anômala. Os autores constataram que a difusão da sacarose foi altamente influenciada pela aplicação de MEF, e que a difusividade mássica efetiva aumentou à medida que o campo elétrico aumentou. Esse aumento na difusividade mássica efetiva pode ser explicado pelos mecanismos de eletroporação que alteram a estrutura da maçã. No entanto, a concentração da solução osmótica não afetou significativamente a difusividade mássica efetiva. Portanto, o efeito combinado de DO com aplicação de MEF nas fatias desta espécie de maçã acelerou a transferência de massa, permitindo reduzir significativamente o tempo de processamento, resultando, assim, no aumento da produtividade e diminuição dos custos operacionais.

---

## Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Nesta seção é apresentada uma descrição detalhada da metodologia empregada durante a realização da desidratação osmótica assistida por campo elétrico moderado, bem como equipamentos, métodos analíticos, modelo matemático, planejamento fatorial e análise estatística utilizados.

O trabalho foi desenvolvido no laboratório LATEPA (Laboratório de Tecnologia e Processamento em Alimentos), situado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

### 3.1 Preparo da Amostra e da Solução de Sacarose

Para realização dos experimentos foram utilizadas maçãs do cultivar Gala, adquiridas semanalmente no supermercado local. As frutas foram selecionadas considerando a ausência de deformações visuais e armazenadas sob refrigeração ( $8 \pm 2^\circ\text{C}$ ) até o momento do uso. As maçãs foram lavadas e cortadas em cubos de  $1\text{ cm}^3$  (Figura 3.1) com um cortador de legumes (Polishop, modelo Perfect Dicer Advance) e imersas em uma solução de NaCl 0,9% (ASSIS; MORAIS; MORAIS, 2016) para prevenir o escurecimento enzimático. Posteriormente, os cubos de maçã foram lavados com água destilada e secos com papel toalha para remover o excesso de água da superfície.

As soluções osmóticas utilizadas durante a desidratação osmótica foram preparadas com sacarose comercial (marca Colombo®) e água destilada, nas concentrações de 40, 50 e 60% (m/m). A sacarose e a água foram pesadas com uma balança semianalítica (marca Gehaka, modelo BK6000). A razão entre amostra e solução osmótica utilizada foi de aproximadamente

1:15 (m/m) para evitar a diluição do meio e, conseqüentemente, impedir a diminuição da força motriz durante o processo.



Figura 3.1 - Cubos de maçã

Segundo Goullieux e Pain (2005), a condutividade elétrica deve ter um valor mínimo de  $500 \mu\text{S cm}^{-1}$  para a aplicação de campo elétrico moderado e aquecimento ôhmico. Desta forma, a condutividade da solução de sacarose foi ajustada para  $500 \mu\text{S cm}^{-1}$  com solução de  $\text{CaCl}_2$  ( $0,6 \text{ g mL}^{-1}$ ) com o auxílio de um condutivímetro (Digimed, modelo DM-3P, com eletrodo modelo DMC-010M e  $K=1 \text{ cm}^{-1}$ ).

### 3.2 Procedimento Experimental

O sistema utilizado durante a desidratação osmótica assistida por campo elétrico moderado pode ser visualizado na Figura 3.2. O sistema é composto por uma célula de desidratação osmótica, sistema de fornecimento de energia, sistema para aquisição de dados, banho de resfriamento (*LAUDA*, modelo Alpha RA8), banho de aquecimento (*LAUDA*, modelo Alpha A6) e um agitador mecânico (Fisatom, modelo 713). O sistema para fornecimento de energia é composto por um regulador de tensão de 0 a 220V (*Sociedade Técnica Paulista LTDA*, modelo Varivolt, Brasil), um estabilizador (*Forceline*, modelo EV 1000T/2-2) e um disjuntor (*Siemens*). Para o controle e monitoramento da temperatura das amostras, foram utilizados dois medidores de temperatura do tipo Pt-100 (*Novus*) de aço inoxidável. A partir do sistema de aquisição de dados, é possível monitorar e registrar os dados de corrente elétrica, tensão elétrica e temperatura ao longo do tempo. A interface do software utilizado é apresentada na Figura 3.3.



Figura 3.2 - Sistema experimental de desidratação osmótica assistida por MEF: (a) célula cilíndrica encamisada, (b) banho de aquecimento, (c) banho de resfriamento, (d) variador de tensão, e) estabilizador e f) sistema de aquisição de dados.

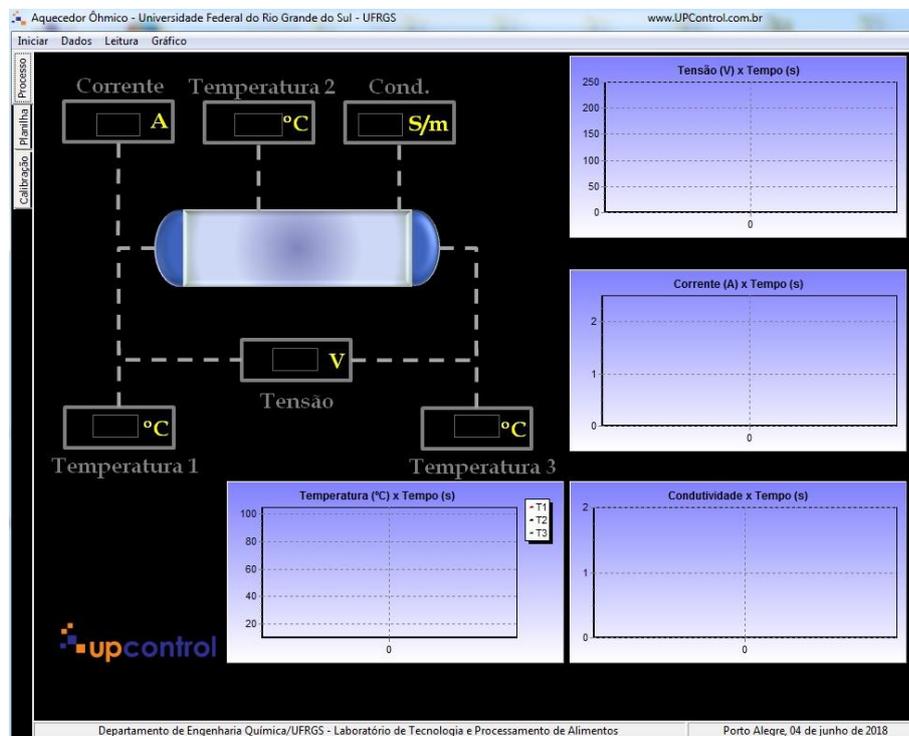


Figura 3.3 - Interface do software utilizado para aquisição de dados.

A Figura 3.4 mostra uma fotografia da célula utilizada nos experimentos. A célula de vidro tem formato cilíndrico ( $d = 17$  cm,  $h = 19,5$  cm) encamisada (espessura = 2 cm) para que a temperatura seja controlada através de banhos termostáticos, mantidos a  $40 \pm 2$  °C. A tampa da célula possui orifícios para a entrada dos eletrodos, dos medidores de temperatura e para a haste do agitador mecânico.



Figura 3.4 - Célula utilizada nos experimentos

Inicialmente, a solução de sacarose foi aquecida até atingir 40 °C com o auxílio do banho de aquecimento e somente então foram adicionados os cubos de maçã. Os cubos de maçã foram colocados dentro da solução osmótica de duas maneiras: os cubos de maçã que necessitavam da determinação de sua massa inicial foram previamente pesados com uma balança analítica (Shimadzu, modelo AY200) e colocados em saquinhos identificados para posterior determinação da perda de massa, conforme mostra a Figura 3.5; os demais cubos, cujas análises não necessitavam da massa inicial, foram colocados diretamente na solução osmótica.



Figura 3.5 - Cubos de maçã para determinação da perda de massa

Durante o tratamento osmótico com aplicação do campo elétrico moderado foram utilizadas tensões de 0, 85 e 170V, de acordo com um planejamento fatorial que será descrito

mais detalhadamente na seção 3.2; essas tensões geram um campo elétrico de 0, 4,7 e 9,36 V cm<sup>-1</sup>, respectivamente.

Em intervalos de tempos determinados (0, 20, 40, 80, 120, 180 e 240 min), foram retiradas amostras da solução osmótica. Para cada intervalo de tempo, foram retirados cubos de maçã e saquinhos previamente pesados, totalizando sete pontos experimentais para cada tratamento. Depois de removidos da solução osmótica, os cubos de maçã foram enxaguados com água destilada para remoção da solução residual e cuidadosamente secos com papel toalha. Em seguida, as amostras foram pesadas e então analisadas físico-quimicamente.

### 3.3 Análises Físico-Químicas

#### 3.3.1 Umidade

A determinação da umidade foi realizada através do método gravimétrico de acordo com AOAC 930.04 (AOAC, 1990). Este método consiste em pesar, em balança analítica (Shimadzu, modelo AY200), aproximadamente 5 g de amostra em uma cápsula.

Após a pesagem, as cápsulas foram levadas à secadora de alimentos (Solab, modelo SL102/100) na temperatura de 105°C até a obtenção de peso constante (de 24 a 48 horas, dependendo das condições da amostra). Passado o tempo de estufa, as cápsulas foram retiradas, resfriadas em dessecador e pesadas novamente. Através da diferença entre a massa inicial e final, foi determinado o teor de umidade da amostra em base seca ( $x^w$ ), de acordo com a Equação 3.1:

$$x^w = \frac{M - M_S}{M_S} \quad (3.1)$$

onde  $M$  é a massa inicial (amostra úmida) e  $M_S$  é a massa final (amostra seca). Este procedimento foi realizado em triplicata para os sete pontos de amostragem de cada tratamento.

#### 3.3.2 Teor de Açúcares

A determinação do teor de açúcares foi realizada para os sete pontos de amostragem de cada tratamento através da análise de sólidos solúveis (°Brix), usando um refratômetro portátil, e por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC, *High Performance Liquid Chromatography*).

A quantificação do teor de açúcares (g de sacarose por g de maçã) por HPLC foi realizada em triplicata para cada ponto de amostragem utilizando um cromatógrafo (Perkin Elmer Corp., modelo Series 200) equipado com um detector de índice de refração. Para separação dos açúcares presentes na maçã, utilizou-se a coluna Luna (Phenomenex, modelo NH2 5µm 100Å, 250 x 4,6 mm) com vazão de fase móvel de 1,6 mL/min de acetonitrila 80% e temperatura de 30°C. O tempo de retenção da frutose foi de 4,9 minutos, da glicose foi de 6,0 minutos, e da sacarose de 8,9 minutos. Para a quantificação dos açúcares foi feita uma curva de calibração, usando sacarose como padrão, conforme apresentado na Figura 3.6.

A extração dos açúcares presentes nos cubos de maçã foi realizada com aproximadamente 4 gramas de amostra e água ultrapura (LIU *et al.*, 2006). A amostra foi triturada em água ultrapura com o auxílio de um mixer (Oster, modelo Unique QuadriMix) e avolumada em balão volumétrico de 100 ml. A amostra foi então filtrada com uma membrana de acetato de celulose de 0,45 µm de tamanho de poro nominal (Unifil, 13 mm de diâmetro, hidrofílica, branca), colocada em eppendorf e congelada até a realização da injeção no HPLC.

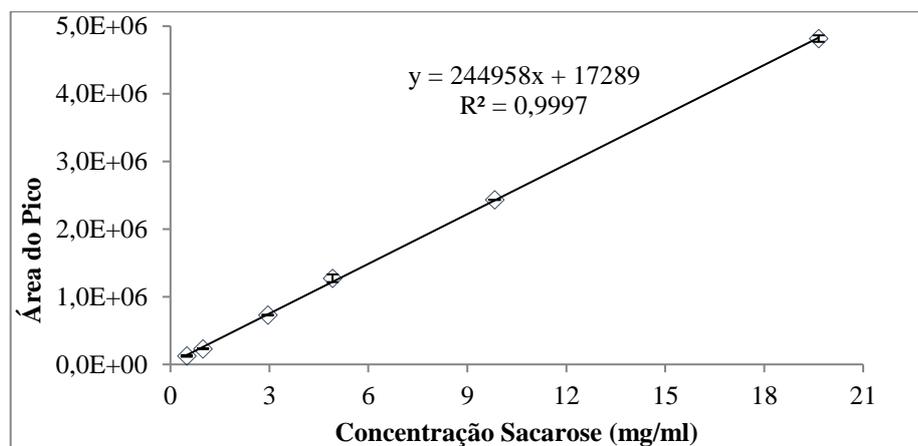


Figura 3.6 - Curva de calibração para determinação de açúcares

A determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix) foi realizada em duplicata para cada ponto de amostragem utilizando um refratômetro digital portátil (Megabrix, modelo REDI-P-301). A extração dos sólidos solúveis presentes foi realizada esmagando 4 cubos de maçã dispostos em um filtro até sua completa extração. Após, o líquido extraído foi homogeneizado e colocado no refratômetro para leitura.

### 3.3.3 Capacidade Redutora

A capacidade redutora foi determinada nas amostras *in natura* e após o processo de desidratação osmótica para os tratamentos que apresentaram a maior difusividade mássica efetiva de água com e sem aplicação de MEF. Para sua determinação, utilizou-se o método espectrofotométrico desenvolvido por Folin Ciocateau (SINGLETON; ROSSI, 1965) utilizando ácido gálico como padrão de referência. A leitura espectrofotométrica foi realizada a 740 nm em espectrofotômetro (PG Instruments Limited, modelo T80 UV/VIS) e os resultados foram expressos em mg equivalente de ácido gálico por 100 g de amostra (base seca). As análises foram realizadas em triplicata e a curva padrão está apresentada na Figura 3.7.

O preparo dos extratos das amostras de maçã foi baseado na metodologia proposta por Holderbaum, Kon e Guerra (2014) com algumas adaptações. Os extratos foram preparados com aproximadamente 5,0 g de maçã utilizando como solvente extrator etanol 80% (v/v). A maçã foi macerada no gral com pistilo de porcelana em 30 ml de etanol 80% e, posteriormente, o conteúdo foi colocado em tubos falcons e centrifugado durante 10 minutos na centrífuga (marca Sigma, modelo 2-16KL) a 12.000 x g por 10 min a 5 °C. Após a centrifugação, o sobrenadante foi colocado num balão volumétrico de 100 ml e os sólidos foram macerados novamente no gral com pistilo em 20 ml de etanol 80% e então, o conteúdo macerado foi colocado novamente no tubo falcon e centrifugado 10 minutos nas mesmas condições da etapa anterior. Após a segunda centrifugação, o sobrenadante foi adicionado no balão e os sólidos foram descartados. O volume do balão foi completado até atingir 100 ml.

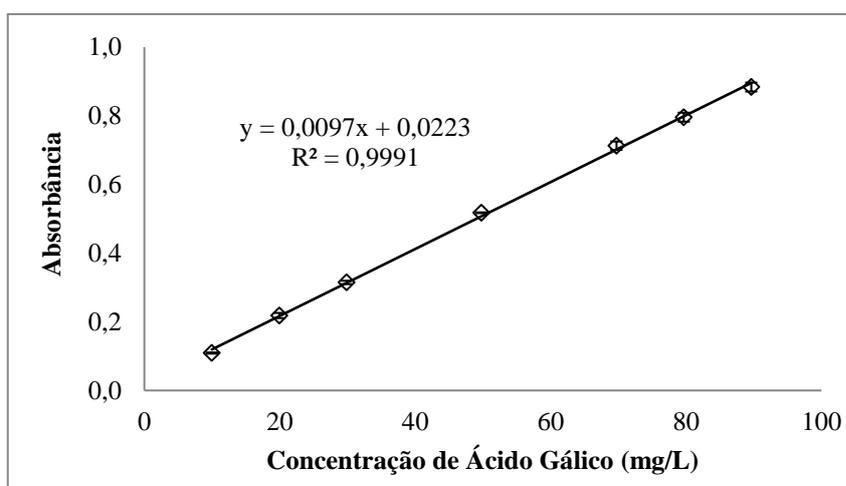


Figura 3.7 - Curva padrão para determinação de capacidade redutora.

Após o preparo dos extratos, iniciou-se a preparação do sistema reacional transferindo para tubos de centrífuga 850 µl de água ultrapura, 200 µl de extrato de cada amostra e 100 µl

de Folin Ciocalteu. Posteriormente, o conteúdo do tubo foi agitado com o auxílio de um agitador de soluções (Phoenix Lufenco, modelo AP56) e então, foi adicionado 850 µl de solução de carbonato de sódio (7%) e agitado novamente no agitador de soluções. O sistema reacional preparado ficou repousando por 1 hora a 25 °C, protegido da luz. Após este período, foi medida a absorvância em cubeta de 10 mm.

### 3.3.4 Textura

A textura dos cubos de maçã foi avaliada nas amostras *in natura* e após a desidratação osmótica através de um analisador de textura (Stable Micro Systems, modelo TA-XT2i®) utilizando um probe cilíndrico de 5 mm. A sonda desceu a uma velocidade de 3,0 mm.s<sup>-1</sup> e comprimiu a amostra muna velocidade de 2,0 mm.s<sup>-1</sup> até atingir a distância que provocou uma deformação de 50%. Após a etapa de compressão, a sonda inverteu sua direção e iniciou o curso ascendente na velocidade de 2,0 mm.s<sup>-1</sup>. Em seguida, um segundo ciclo de descida e subida foi executado na mesma amostra. Uma curva força versus tempo foi gerada pelo equipamento, e a partir desta curva foram determinadas dureza, coesão, elasticidade e fragilidade (KHIN; ZHOU; YEO, 2006).

As análises de textura foram realizadas nos cubos de maçã *in natura* e após 4 horas de desidratação osmótica para todos os tratamentos, sendo analisados 5 cubos para amostras frescas e 5 cubos para amostras processadas.

### 3.3.5 Cor

Para avaliação da cor das amostras, os cubos de maçã foram dispostos em cubetas de plástico e a leitura dos parâmetros de cor foi realizada utilizando-se um colorímetro (HunterLab, modelo ColorQuest XE). Para tanto, os parâmetros  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  foram medidos, sendo essa avaliação realizada no modo da reflectância especular incluída, utilizando fonte de iluminação D65 e ângulo de observação de 10°. Na escala CIELab, o parâmetro  $L^*$  indica a luminosidade das amostras e varia de 0 (negro absoluto) a 100 (branco absoluto); valores positivos e negativos da coordenada cromática  $a^*$  indicam a direção do vermelho ao verde, respectivamente, enquanto que valores positivos e negativos da coordenada cromática  $b^*$  indicam a direção do amarelo ao azul, respectivamente. A análise de cor nos cubos de maçã foi realizada na amostra *in natura* e após 4 horas de desidratação osmótica. As análises foram realizadas para verificar a manutenção da cor após a execução de cada tipo de tratamento. Além da luminosidade  $L^*$  e

das coordenadas cromáticas  $a^*$  e  $b^*$ , a variação de cor pode ser verificada através do cálculo dos parâmetros  $\Delta E^*$ ,  $C_{ab}^*$  e  $h_{ab}$ , conforme as Equações 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3.2)$$

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.3)$$

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.4)$$

onde  $\Delta L^* = L^* - L_{in}^*$ ,  $\Delta a^* = a^* - a_{in}^*$  e  $\Delta b^* = b^* - b_{in}^*$ . O subscrito 'in' indica a cor da amostra *in natura*.

Segundo Minolta (1998), o valor de  $\Delta E^*$  indica a variação total de cor sofrida pela amostra, enquanto o valor de  $C_{ab}^*$  indica a cromaticidade (vivacidade da cor) e o valor de  $h_{ab}$  indica o ângulo de tonalidade (localização da cor no plano cromático). Para a análise da cor dos cubos de maçã foram preparadas três cubetas contendo as amostras e cada cubeta foi lida em duas faces.

### 3.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento versátil e muito utilizado para realizar a varredura da superfície da amostra, baseado no emprego de um feixe de elétrons da ordem de kV de energia (Potter & Love, 1999). A técnica MEV foi empregada a fim de verificar possíveis mudanças estruturais da fruta decorrentes do tratamento osmótico convencional e assistido por MEF em relação a maçã *in natura*.

Amostras de maçã *in natura* e desidratadas osmoticamente por 4 horas para os tratamentos que apresentaram a maior difusividade mássica efetiva de água com e sem aplicação de MEF, foram analisadas em duplicata utilizando um microscópio eletrônico de varredura (Jeol, modelo JSM-6610) do Centro de Microscopia e Microanálise da UFRGS. A fixação de amostras foi realizada por imersão em glutaraldeído (2-4%) por cinco dias em tampão fosfato 0,1 M a 4 °C. Posteriormente, as amostras foram desidratadas por imersão em soluções de acetona (30, 50, 70 e 90%) por 10 min cada. As amostras foram então imersas em acetona pura por 20 min, depois secas em um secador de ponto crítico (Bal-Tec, modelo CPD 030). Após a desidratação, as amostras foram fixadas em *stubs* com uma fita metálica dupla face de carbono e cobertas com uma camada de ouro com o auxílio de um metalizador (Bal-

Tec, modelo CPD 050). As amostras foram examinadas a uma tensão de aceleração de 15 kV com escala de aproximação de 200 vezes.

### 3.4 Parâmetros da Desidratação Osmótica

Para analisar o processo de transferência de solutos e água entre os cubos de maçã e solução osmótica de sacarose calcula-se a perda de água ( $WL$ ) e o ganho de sólidos ( $SG$ ). Para determinação destes parâmetros, as Equações 3.5 e 3.6 foram consideradas (MORENO *et al.*, 2011b).

$$WL = \frac{M_t^0 \cdot X_t^w - M_0^0 \cdot X_0^w}{M_0^0} \quad (3.5)$$

$$SG = \frac{M_t^0 \cdot X_t^{ss} - M_0^0 \cdot X_0^{ss}}{M_0^0} \quad (3.6)$$

onde  $M_t^0$  e  $M_0^0$  representam a massa no tempo  $t$  e 0, respectivamente, e  $X_t^w$ ,  $X_t^{ss}$ ,  $X_0^w$  e  $X_0^{ss}$  são a fração mássica de água ( $w$ ) e sólidos ( $ss$ ) da amostra no tempo  $t$  e 0, respectivamente.

A perda de água e o ganho de sólidos foram determinados em triplica para os sete pontos de amostragem dos diferentes tratamentos.

### 3.5 Modelo Matemático

O modelo utilizado neste estudo, com base na Segunda Lei de Difusão de Fick para estado transiente, prevê a quantidade de água que deixa a fruta e a quantidade de soluto que entra na fruta em função do tempo. Esse modelo foi descrito com detalhes na seção 2.3.1.

Para utilização deste modelo, foram feitas as seguintes considerações:

- as concentrações iniciais de água e de sólidos solúveis nos cubos de maçã são uniformes;
- o processo é isotérmico;
- os fluxos são simultâneos e em contracorrente: difusão de água da maçã para a solução e difusão de açúcar da solução para a maçã;
- a parede celular é uma membrana semipermeável hipotética, que permite apenas a permeação de água e açúcar;
- o encolhimento das amostras é desprezível;
- a resistência externa à transferência de massa é negligenciável.

Os valores de número de Fourier ( $Fo$ ) foram obtidos a partir da Equação 2.3, levando-se em consideração os quatro primeiros termos da série. O gráfico do Número de Fourier versus o tempo de imersão dá origem a uma reta. A difusividade mássica efetiva ( $De$ ) foi calculada a partir do coeficiente angular da reta do número de Fourier versus tempo de imersão, multiplicado pela metade da aresta do cubo ao quadrado, de acordo com a Equação 2.4.

A perda de água e o ganho de solutos no equilíbrio foram determinados através do Modelo de Peleg (1988), utilizando as Equação 2.9 e 2.10, já descritas em detalhes na seção 2.3.2.

### 3.6 Planejamento Fatorial e Análise Estatística

Um planejamento fatorial  $2^2$ , incluindo ponto central e tratamentos em duplicata (totalizando 10 tratamentos), foi conduzido para analisar diferentes condições de processo. As variáveis independentes, concentração de sacarose (%) na solução osmótica ( $x_1$ ) e tensão elétrica (V) aplicada ( $x_2$ ), foram avaliadas em 3 níveis. Os níveis de tensão elétrica e concentração de sacarose são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Planejamento fatorial com ponto central

Exp.	$x_1$	$x_2$	Conc. sacarose (%)	Tensão elétrica (V)
1A	-1	-1	40	0
1B	-1	-1	40	0
2A	1	-1	60	0
2B	1	-1	60	0
3A	-1	1	40	170
3B	-1	1	40	170
4A	1	1	60	170
4B	1	1	60	170
5A	0	0	50	85
5B	0	0	50	85

As respostas avaliadas estatisticamente foram o teor de umidade no equilíbrio ( $y_1$ ), teor de sacarose no equilíbrio ( $y_2$ ), perda de água ( $y_3$ ), incorporação de sacarose ( $y_4$ ), difusividade mássica efetiva da água ( $y_5$ ), difusividade mássica efetiva da sacarose ( $y_6$ ), variação total de cor ( $y_7$ ), dureza ( $y_8$ ), fragilidade ( $y_9$ ), coesão ( $y_{10}$ ) e elasticidade ( $y_{11}$ ).

O modelo polinomial da Equação 3.7 foi utilizado para modelagem dos dados experimentais:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (3.7)$$

onde  $\beta_n$  são os coeficientes de regressão;  $y_i$  é a variável de resposta e  $x_1$  e  $x_2$  são as variáveis independentes.

Para análise dos resultados foi utilizada a análise de variância (ANOVA), metodologia de superfície de resposta e teste de Tukey para comparação entre as médias, com um nível de confiança de 95%, através do *software* Statistica®, versão 10.0 (Statsoft Inc., Tulsa).

Também foram utilizados alguns critérios estatísticos para avaliar a adequação dos modelos propostos, incluindo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o qui-quadrado ( $\chi^2$ ), a raiz quadrada do erro médio ( $RMSE$ ) e erro médio ( $E$ ).  $\chi^2$ ,  $RMSE$  e erro médio são dados pelas Equação 3.8, 3.9 e 3.10, respectivamente.

$$\chi^2 = \frac{\sum(\alpha_{pred.} - \alpha_{exp.})}{n - p} \quad (3.8)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[ \sum_n (\alpha_{pred.} - \alpha_{exp.})^2 \right]^{0.5} \quad (3.9)$$

$$E(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\alpha_{exp} - \alpha_{pred.}|}{\alpha_{exp}} \quad (3.10)$$

onde  $n$  é o número de observações,  $p$  é o número de parâmetros,  $\alpha_{exp.}$  e  $\alpha_{pred.}$  são os resultados experimentais e previstos pelo modelo, respectivamente.

---

## Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados na forma de artigo científico e de resultados complementares. O subcapítulo 4.1 apresenta o artigo, e o subcapítulo 4.2 os resultados complementares, onde são apresentados os resultados referentes à determinação do conteúdo de umidade e sacarose no equilíbrio, análise colorimétrica, textura e capacidade redutora.

### 4.1 Artigo

#### Osmotic dehydration of apple assisted by moderate electric field

Aline Fronza <sup>1</sup>, Ligia Damasceno Ferreira Marczak <sup>1</sup>, Giovana Domeneghini Mercali <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chemical Engineering Department, Federal University of Rio Grande do Sul, Engenheiro Luiz Englert Street - Porto Alegre, RS, 90040-040 – Brazil.

<sup>2</sup>Department of Food Science, Institute of Food Science and Technology, Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue, 9500, Porto Alegre, RS, 91501-970 - Brazil.

---

**Abstract:** *Osmotic dehydration (OD) is a drying process that consists in placing the food in contact with concentrated solutions of soluble solids, thus reducing the water activity of the food. The main drawback of this technology is the long time necessary for the process to reach steady state, which makes it impracticable in industrial scale. The application of a moderate electric field (MEF) during the process can make it faster and, therefore, an option when it comes to large-scale food preservation. The use of MEF may promote increase of the mass transfer rates due to the non-thermal effects of electroporation and permeabilization of the food cells. In this context, the objective of the study was to investigate the mass transfer process kinetics during apples OD assisted by MEF, evaluating the non-thermal effects of this technology on drying rate of the process. The experiments were conducted with sucrose*

solutions (40, 50 and 60%, m/m), using a sample/solution proportion of 1:15 (m/m). Samples were submitted to different electrical voltages (0, 85 and 170 V), keeping the temperature constant (40 °C). Results indicated that the application of MEF favors water loss and incorporation of solids in the samples.

**Keywords:** *apple, drying, non-thermal effects, electrical technologies.*

---

## 1. Introduction

Osmotic dehydration (OD) is a process wherein foods are partially dehydrated by immersion in an aqueous hypertonic sugar or salt solutions. Diffusion phenomena take place with two simultaneous countercurrent flows: a water flow from the food to the outer solution (water loss) and a simultaneous flow of solute from the solution to the plant tissue (solid gain). The water removal from fresh plant tissues is usually greater than the solute gain because of the cell membranes semi-permeability. Osmotic dehydration reduces the water activity of the food, thereby minimizing the potential growth of microorganisms and extending the shelf life of food products (Ahmed, Qazi, & Jamal, 2016; Simpson et al., 2015).

Recently, OD has been combined with several other methods, such as pulsed electric field (PEF), moderate electric field (MEF), ultrasound and centrifugal force, among others. These techniques have been employed before or during osmotic treatment to enhance OD performance by increasing the cell membrane permeability and the mass transfer rates. These combined operations reduce the drying time, minimizing further energy costs (Goula *et al.*, 2017; Kulshrestha and Sastry, 2003; Nowacka *et al.*, 2018).

Sensoy *et al.* (2004) define the MEF treatment as a process characterized by use of electric fields typically from 1 to 1000 V/cm, with arbitrary waveforms and with or without the associated ohmic heating effects. Depending on the relative electrical and thermal exposure of a particular treatment, it is possible to obtain a wide variety of effects in biological materials. Cells have a natural potential transmembrane difference across their membranes, and an applied external electric field tends to alter this potential difference. A critical value of the external electric field is required to induce a transmembrane potential value (between 0.2 and 1.0 V) sufficient to allow the formation of reversible or irreversible pores in the membrane. This phenomenon, known as electroporation or electropermeabilization, increases the permeability of the cell (Coster, 1965; Weaver and Chizmadzhev, 1996).

---

Allali *et al.* (2009) and Moreno *et al.* (2011) studied the influence of ohmic heating as a pretreatment on OD kinetics. The authors concluded that ohmic heating, even for short treatments, caused significant changes in the cellular structure of apples and increased mass transfer (water loss and solid gain) during OD. Simpson *et al.* (2015) determined the diffusion mechanisms in Granny Smith apples submitted to MEF, with electric field varying from 0 to  $17 \text{ V cm}^{-1}$ . The authors observed that the diffusion of sucrose is highly influenced by the application of MEF, and that the effective mass diffusivity increases as the electric field increases.

The aim of this research was to study apples OD assisted by MEF, evaluating the non-thermal effects of the electricity on water loss (*WL*), solid gain (*SG*) and water and sucrose effective mass diffusivities. The practical application of this study is to reduce the time process making it an option when it comes to large-scale food preservation.

## 2. Materials and methods

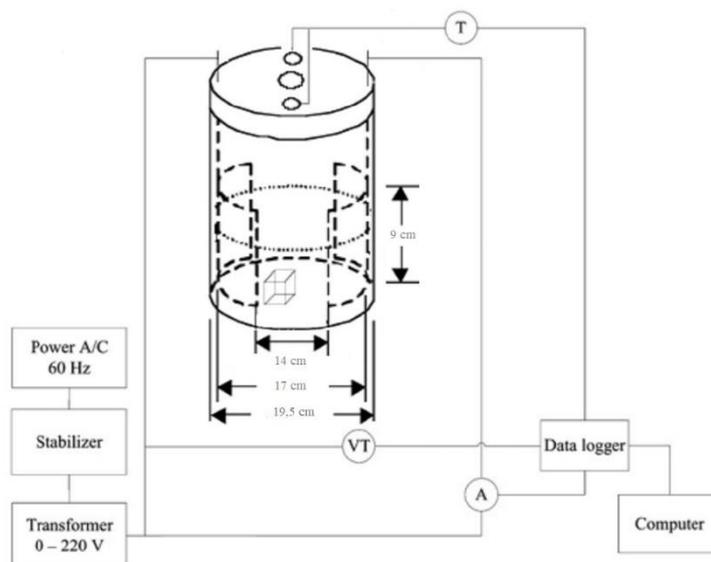
### 2.1 Samples

Gala apples were weekly purchased in a local supermarket and kept under refrigeration at  $8 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . The apples were washed and cut in cubes ( $1 \text{ cm}^3$ ) with a vegetable cutter and immersed in a 0.9% sodium chloride solution to prevent enzymatic browning (Assis *et al.*, 2017). Afterwards, the apple cubes were washed with distilled water and dried with paper towel to remove the excess of water from the surface of the cube. Osmotic solutions of 40, 50 and 60% concentrations (w/w) were prepared with commercial sucrose and distilled water.

### 2.2 Osmotic dehydration assisted by MEF

The experimental setup comprises a power supply, a variable transformer (Sociedade Técnica Paulista LTDA, Varivolt, Brazil), a stabilizer (Forceline, EV 1000 T/2-2, Brazil), a data acquisition system, a computer and an ohmic cell. The experimental apparatus is schematically shown in Fig. 1. The voltage across and the current through the sample were measured using voltage and current transducers. The temperature was monitored by two stainless steel temperature sensors (Novus, pt-100, Brazil). These variables were recorded at constant time intervals by a data logger (Novus, Field logger, Brazil) linked to a computer. The cell was cylindrical glass cell with 4.42 L ( $d = 17 \text{ cm}$ ,  $h = 19.5 \text{ cm}$ ) equipped with lid and a water jacket. A temperature-controlled water bath (Lauda, Alpha A6 and Alpha RA8, Brazil) was connected to the cell to maintain the solution at  $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  for both the conventional and

MEF treatments. Two Pt-100 stainless steel were used to monitor the solution temperature. The data acquisition system allows recording the electric current, voltage and temperature every second. . The lid of the vessel contained four ports for temperature sensors and two ports for the electrodes, in different radial positions. The electrodes were made of platinum with 9 cm of height and the maximum and minimum inter-electrode gaps were 14 and 17 cm, respectively.



**Figure 1.** Schematic diagram of the MEF setup.

In addition, mechanical stirring (Fisatom, 713, Brazil) with stirrer rod in polymer, was provided to promote intense and constant agitation in order to obtain a homogeneous solution and assume a high convective mass transfer coefficient ( $k_c \rightarrow \infty$ ). This condition allows us to assume that the concentration is constant on the surface of the cube.

The fruit/solution ratio used was, approximately, 1:15 (w/w) to avoid dilution of the solution. According Goullieux and Pain (2005), the electrical conductivity must have a minimum value of  $500 \mu\text{S cm}^{-1}$  for the application of MEF; thus, the electrical conductivity of the sucrose solution was adjusted to  $500 \mu\text{S cm}^{-1}$  with  $\text{CaCl}_2$  solution ( $0.6 \text{ g mL}^{-1}$ ). Each experimental run was performed for 4 h, and samples were withdrawn at different times (0, 20, 40, 80, 120, 180 e 240 min) to measure their sugar and water concentration.

### 2.3 Determination of moisture content

Moisture content of the samples were determined according to the AOAC 930.04 method (AOAC, 1990). Samples were dried in an oven (Solab, SL102/100, Brazil) at  $105 \text{ }^\circ\text{C}$

until constant weight. The analyses were conducted in triplicate. The parameters  $WL$  and  $SG$  were determined by the Equations 1 and 2 (Moreno, Simpson, Sayas, et al., 2011):

$$WL = \frac{M_t^0 \cdot X_t^w - M_0^0 \cdot X_0^w}{M_0^0} \quad (1)$$

$$SG = \frac{M_t^0 \cdot X_t^{ss} - M_0^0 \cdot X_0^{ss}}{M_0^0} \quad (2)$$

where  $M_t^0$  and  $M_0^0$  are the sample weights at time  $t$  and 0, respectively;  $X_t$  and  $X_0$  are mass fractions in the sample at time  $t$  and 0, respectively, with the superscripts  $w$  and  $ss$  referring to water and soluble solids, respectively.

#### 2.4 Determination of sugar content

The sugar content (glucose, sucrose, and fructose) were determined by a HPLC method with refractive index detection. The extraction of the sugars presented in the apple cubes was carried out following the methodology described by (Liu, Ying, Yu, & Fu, 2006). Four grams of sample was crushed in ultrapure water with a mixer (Oster, Unique QuadriMix, Brazil) and filled in a 100 ml volumetric flask. Then, samples were passed through a 0.45  $\mu\text{m}$  porosity filter and frozen until the HPLC injection. The HPLC (Perkin Elmer Corp., Series 200, EUA) settings were: Luna  $\text{NH}_2$  (250 x 4,6 mm i.d.) column (Phenomenex,  $\text{NH}_2$  5 $\mu\text{m}$  100 $\hat{\text{A}}$ , EUA), mobile phase of acetonitrile/water (V/V) = 80:20, flow rate of 1.6 mL/min, running time of 10 min and temperature of 30  $^\circ\text{C}$ . The calibration curve ( $R^2 = 0.9997$ ) was obtained with a standard sucrose solution at six different concentrations, in duplicate. Each sample was injected twice, and the sugar content were determined in triplicate for the seven withdrawn samples of the different treatments.

#### 2.5 Mathematical models

The Peleg's equation and Fick's second law of diffusion were the mathematical models used to fit the experimental data.

##### 2.5.1 Peleg's Model

The equation proposed by Peleg can describe the moisture sorption curves that relate the moisture content as a function of time and allow the estimation of moisture content after

long exposure times from data of relatively short times (Peleg, 1988). Equations 3 and 4 describe the Peleg's model applied to water and solute, respectively:

$$x_t^w - x_0^w = -\frac{t}{k_1^w + k_2^w t} \quad (3)$$

$$x_t^s - x_0^s = \frac{t}{k_1^s + k_2^s t} \quad (4)$$

where  $x_t^w$  and  $x_0^w$  are the moisture content of a sample at time  $t$  and zero, respectively;  $x_t^s$  and  $x_0^s$  are the solute content in the sample at time  $t$  and zero, respectively;  $k_1^w$ ,  $k_1^s$ ,  $k_2^w$  and  $k_2^s$  are model parameters. The water and solute concentrations at equilibrium conditions ( $x_\infty^w$  and  $x_\infty^s$ ) were determined by Equations 5 and 6:

$$x_\infty^w = x_0^w - \frac{1}{k_2^w} \quad (5)$$

$$x_\infty^s = x_0^s + \frac{t}{k_2^s t} \quad (6)$$

### 2.5.2 Fick's second law of diffusion

The model used in this study, based on the Fick's second law of diffusion for transient state, predicts the amount of water leaving the sample and the amount of solute that enters the sample as a function of time. According to Crank (Crank, 1975), the solution of the Fick's second law for a flat plate applied to a cubic geometry is given by Equation 7:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left\{ -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{F_0}{4} \right\} \right]^3 \quad (7)$$

where  $M_t$  is the amount of water lost at time  $t$ , and  $M_\infty$  is the amount of water lost when the system reaches the equilibrium condition;  $F_0$  is the mass Fourier number, defined by Equation 8:

$$F_0 = \frac{D_e t}{l^2} \quad (8)$$

where  $D_e$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) is the effective mass diffusivity,  $l$  (m) is the half of the cube length and  $t$  (s) is the immersion time.

---

For the proposed model, the following assumptions were considered: (a) initial concentrations of water and soluble solids in apple cubes are uniform; (b) the process is isothermal (40 °C); (c) simultaneous and counter-current flows: only diffusion of water from the apple to the solution and diffusion of sugar from the solution to the apple; (d) the cell wall is a hypothetical semipermeable membrane, which allows only water and sugar permeation; (e) sample shrinkage is negligible; and (f) a negligible mass transfer external resistance (guaranteed by the intense stirring of the solution).

## 2.6 Structural analyses

Structural analyses were conducted in fresh and treated samples using a scanning electron microscope (Oxford Instruments, Jeol JSM-6610, UK). Sample fixation was accomplished by immersion in glutaraldehyde (2–4%) for 5 days in a 0.1 M phosphate buffer (pH 7.2–7.4) at 4 °C. The samples were dehydrated by immersion in acetone solutions (30, 50, 70 and 90%) for 10 min. The samples were then immersed in pure acetone for 20 min and dried in a critical point dryer (Bal-Tec, CPD 030, Germany) and then covered with a thin golden layer. The analysis was carried out with an acceleration voltage of 15 kV and with an approximation scale of 200 times.

## 2.7 Texture

The texture profile analyses were made with TA-XT2i<sup>®</sup> texture analyzer (Stable Micro Systems, Godalmine, UK) in fresh and treated samples, using a 5 mm cylindrical probe. The probe descended at a speed of 3.0 mm/s and compressed the sample at a speed of 2.0 mm/s up to a distance making 50% deformation. When the compression stroke was completed, the probe abruptly reversed its direction and started the upward stroke at 2.0 mm/s. Then a second down and up cycle was run on the same sample. A force-time curve was recorded by the instrument, and two textural attributes, including hardness and brittleness, were measured. Hardness was defined by the peak force during the first compression cycle, and brittleness was measured as the distance traveled by the probe to reach the first peak in the first cycle. Hardness was defined as the height of the force peak on the first compression cycle (first bite), and fracturability (originally called brittleness) was defined as the force of the significant break in the curve on the first bite (Wayne, 2014).

## 2.8 Color Analysis

The color was measured using a colorimeter ((HunterLab, ColorQuest XE, USA) based on the CIELab color space, after calibration with the white and black glass standards. The measurements were performed in triplicate and in two different places on each sample. The parameters lightness ( $L^*$ ), green–red hue ( $a^*$ ) and blue–yellow hue ( $b^*$ ) were measured considering standard illuminant  $D_{65}$  and observer  $10^\circ$ . The total color difference ( $\Delta E$ ) was calculated according to Equation 9:

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (9)$$

where  $\Delta L^* = L^* - L_{in}^*$ ,  $\Delta a^* = a^* - a_{in}^*$  e  $\Delta b^* = b^* - b_{in}^*$ . The subscript 'in' indicates the color of the fresh sample.

## 2.9 Reducing Capacity

The reducing capacity was determined in triplicate for fresh and treated samples using the Folin Ciocalteu (FC) method (Singleton and Rossi, 1965). An aliquot of 850  $\mu\text{l}$  of ultra-pure water was transferred to a plastic tube; next, 200  $\mu\text{l}$  of the apple extract and 0.5 ml of FC reagent were added to the tube, and the mixture was agitated with a vortex (Phoenix Lufenco, AP56, Brazil). After, 850  $\mu\text{l}$  of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (7%) was added and agitated again. The prepared reaction system was left standing for 1 hour at ambient temperature, protected from light. Finally, absorbance was measured at 740 nm with a spectrophotometer (PG Instruments Limited, T80 UV/VIS, United Kingdom) and the results were expressed as gallic acid equivalent (GAE)/100 g dry matter using a calibration curve.

## 2.10 Statistical analysis

The effects of the sucrose solution concentration ( $SC$  - 40, 50 and 60%) and voltage applied ( $V$  - 0, 85 and 170 V) were analyzed by a factorial design  $2^2$  with central point, as can be seen in Table 1. All experiments were performed in duplicate. The considered dependent variables were the water loss ( $WL$ ), solid gain ( $SG$ ), effective mass diffusivity of water ( $De^w$ ), effective mass diffusivity of sucrose ( $De^s$ ), and textural attributes including hardness and brittleness. The following polynomial model was fitted to the data:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (10)$$

where  $\beta_n$  are constant regression coefficients,  $y$  is the response or dependent variable and  $x_1$  and  $x_2$  are the coded independent variables for sucrose concentration and voltage applied, respectively.

The experimental design, the analysis of variance (ANOVA) and Tukey's means multiple comparison test were conducted with a confidence level of 95% (Statistica version 10.0, StatSoft, Inc. Tulsa, OK).

**Table 1.** Factor planning with center point.

Treatment	$x_1$	$x_2$	Voltage (V)	Sucrose Concentration (%)
1	-1	-1	0	40
2	-1	1	0	60
3	1	-1	170	40
4	1	1	170	60
5	0	0	85	50

Statistical criteria were considered to evaluate the goodness of fit of the proposed models, including the coefficient of determination ( $R^2$ ), chi-square ( $\chi^2$ ), the root mean square error ( $RMSE$ ) and mean error ( $E$ ).  $\chi^2$ ,  $RMSE$  and  $E$  show the size of the error and are given by Equations 11, 12 and 13, respectively:

$$\chi^2 = \frac{\sum(\alpha_{pred.} - \alpha_{exp.})}{n - p} \quad (11)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[ \sum_n (\alpha_{pred.} - \alpha_{exp.})^2 \right]^{0.5} \quad (12)$$

$$E(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\alpha_{exp} - \alpha_{pred.}|}{\alpha_{exp}} \quad (13)$$

where  $n$  is the number of observations,  $p$  is the number of parameters,  $\alpha_{pred.}$  and  $\alpha_{exp.}$  are the predicted and experimental residual values, respectively.

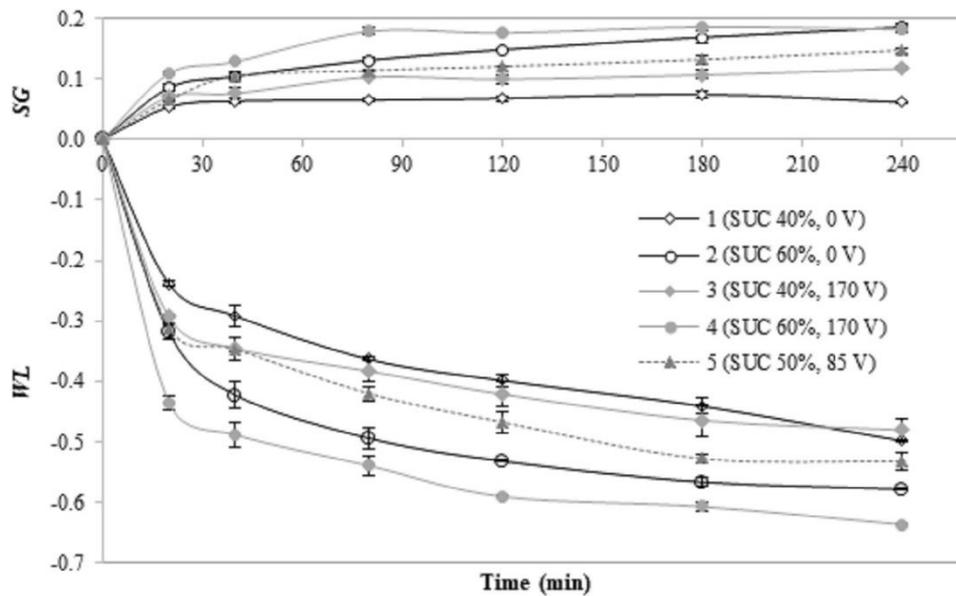
### 3. Results and discussion

#### 3.1 Water loss and solid gain

Figure 2 shows water loss and solid gain of dehydrated apple for different treatments at 40 °C during 4 hours. It must be noted that  $WL$  is negative according to the definition given by

Eq. 1. For the treatments with 40% sucrose concentration,  $WL$  was higher at the beginning of the dehydration process for the treatment with MEF application (first 60 min) when compared with the control treatment (without MEF application); however, after 80 min,  $WL$  was practically the same for both treatments. On the other hand, for treatments with 60% sucrose concentration, the application of MEF increased  $WL$  during the whole dehydration process.

Table 2 presents the effects of the coded independent variables on  $WL$ ,  $SG$ ,  $De^w$  and  $De^s$ . For  $WL$ , only  $V$  was not significant at the 95% confidence level;  $SC$  and the interaction between  $SC$  and  $V$  positively affected  $WL$ , indicating that the application of MEF combined with the increase of  $SC$  increased the  $WL$ . This result shows that the non-thermal effects, caused by the electroporation phenomenon, positively contributed to the osmotic dehydration process. The application of MEF induced pore formation, increasing the permeability of the cell and contributing to a higher  $WL$ .



**Figure 2.** Water loss ( $WL$ ) and solid gain ( $SG$ ) over time for different osmotic treatments.

Concerning  $SG$ , treatments with 40% sucrose concentration with and without MEF application presented practically the same behavior at the beginning of the dehydration process (Figure 2); after 80 min, however, the  $SG$  was greater with MEF application. For treatments with 60% sucrose concentration, the application of MEF increased  $SG$  at the beginning of the OD process when compared with the control, and it remained practically constant after 80 min of dehydration. The statistical analysis, shown in Table 2, reveals that all factors were significant for  $SG$ ;  $SC$  and the  $V$  had a positive affect while their interaction had an opposite

influence, with a negative effect on *SG*. Overall, the combination of MEF with high *SC* promoted a faster dehydration process towards the equilibrium.

**Table 2.** Effects of the coded independent variables on water loss and solid gain and the regression coefficients.

	Effect	<i>p</i>	Regression Coefficient	Effect	<i>p</i>	Regression Coefficient
	<i>WL</i>			<i>De<sup>w</sup></i>		
Mean	-0.545	< 0.001	-0.54521*	7.77E-10	< 0.001	7.77E-10*
Sucrose concentration	-0.118	< 0.001	-0.05901*	2.42E-10	< 0.001	1.21E-10*
Voltage	-0.020	0.128	-0.01007	2.57E-10	< 0.001	1.28E-10*
Sucrose conc. x Voltage	-0.038	0.018	-0.01923*	1.43E-10	< 0.001	7.16E-11*
	<i>SG</i>			<i>De<sup>s</sup></i>		
Mean	0.139	< 0.001	0.138893*	2.78E-10	< 0.001	2.78E-10*
Sucrose concentration	0.094	< 0.001	0.047275*	-4.37E-11	0.094	-2.18E-11
Voltage	0.026	0.001	0.013109*	9.37E-11	0.007	4.68E-11*
Sucrose conc. x Voltage	-0.030	< 0.001	-0.014840	6.19E-12	0.781	3.09E-12

\*Significant at 95% of confidence level.

Figure 2 also shows that *SG* reached equilibrium after 80 min of OD, while *WL*, even after 4 hours, was still not constant. Osmotic treatment assisted by MEF significantly affected *WL* and *SG* kinetics, and the osmotic treatment was effective to reduce the water content of the osmodehydrated apples. Moreno, Simpson, Sayas, *et al.* (2011) concluded that the application of vacuum impregnation and ohmic heating during osmotic treatment had significant effects on *WL* and *SG* kinetics in pear samples. The combination of osmotic dehydration at atmospheric pressure and ohmic heating (OD–OH) favored mass transfer, the greatest *WL* was observed with the OD–OH treatment. Dellarosa *et al.* (2016) applied pulsed electric field (PEF) as a pre-treatment in the osmotic dehydration and found that this combination is an effective alternative to improve *WL* from apple tissue due to changes in the membrane permeability.

### 3.2 Effective mass diffusivity

The experimental effective mass diffusivity of water and sucrose were obtained from Equation 9. Fourier numbers (*Fo*) were calculated by non-linear regression analysis from Equation 8, taking into account the first four terms of the series. Peleg's model was used to determine *WL* and the *SG* in the equilibrium condition (Peleg, 1988).

**Erro! Fonte de referência não encontrada.** shows the experimental and predicted effective mass diffusivity of water (*De<sup>w</sup>*) for all different treatments. Table 3 also shows the

parameters used to evaluate the solution of the Fick's second law model performance to describe the osmotic dehydration process.  $De^w$  values were between  $6.23 \times 10^{-10}$  and  $11.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . The highest value was obtained for 170 V with sucrose concentration of 60% (treatment 4), indicating that the  $De^w$  was affected by the concentration of the osmotic solution and application of MEF. The lowest value of  $De^w$  was obtained without the application of MEF and with sucrose concentration of 40% (treatment 1). Comparing this result with the one obtained for the experiment with 40% concentration and the application of MEF (treatment 3), it is possible to conclude that MEF application significantly effects the  $De^w$ . The magnitude of  $De^w$  values obtained in the present work were similar to those reported in the literature for apples (Derossi *et al.*, 2008; Saravacos and Maroulis, 2011).

According the statistical analysis (table 2),  $De^w$  were affected by all effects at the 95% confidence level;  $SC$ ,  $V$  and the interaction between  $SC$  and  $V$  positively affected  $De^w$ , indicating that the application of MEF combined with the increase of  $SC$ , augmented  $De^w$ . As aforementioned for  $WL$ , the effects caused by the electroporation phenomenon positively contributed to the water transfer process, increasing, therefore,  $De^w$  values.

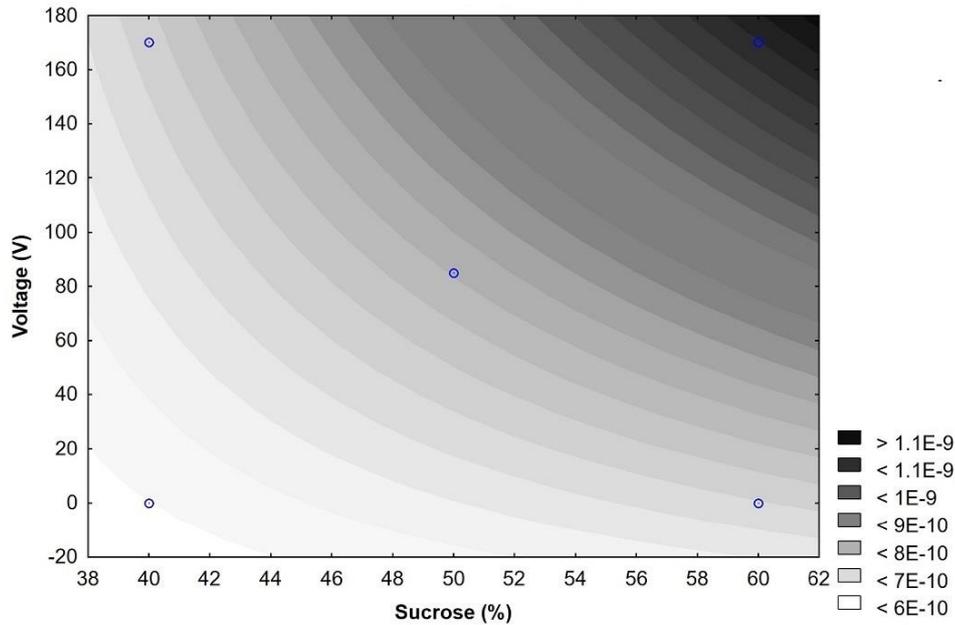
Figure 3 shows contour lines for  $De^w$  as a function of sucrose concentration (%) and voltage (V) applied. It is possible to observe that there was a significant difference ( $p > 0.05$ ) between results when  $SC$  increased. The same behavior is observed when  $V$  increased. Therefore, both parameters positively influence  $De^w$ .

**Table 3.** Experimental and predicted effective mass diffusivities of water.

Treat.	$De^w \times 10^{10} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$		$R^2$	$\chi^2 \times 10^{10}$	$RMSE \times 10^{10}$	E (%)
	Experimental	Predicted				
1 (SUC 40%, 0 V)	$6.28 \pm 0.05$	5.99	0.93	0.03	0.40	
2 (SUC 60%, 0 V)	$7.26 \pm 0.06$	6.98	0.85	0.02	0.40	
3 (SUC 40%, 170 V)	$7.4 \pm 0.3$	7.13	0.85	0.05	0.41	6.31
4 (SUC 60%, 170 V)	$11.3 \pm 0.2$	10.98	0.72	0.02	0.66	
5 (SUC 50%, 85 V)	$6.6 \pm 0.2$	7.77	0.90	0.34	0.57	

Table 4 shows the experimental and predicted effective mass diffusivity of sucrose ( $De^s$ ) for all different treatments. This table also shows the parameters used to evaluate the solution of the Fick's second law model performance to describe the osmotic dehydration process. The  $De^s$  values are between  $2.1 \times 10^{-10}$  and  $3.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . The highest values were found for 170 V with sucrose concentration of 40% and 60% (treatment 3 and 4, respectively). As can be seen

in Table 2,  $De^s$  values were not affected by SC; only  $V$  positively affected  $De^s$ , indicating that this variable was exclusively influenced by application of MEF. The second Fick's law model was suitable to predict  $De^w$  and  $De^s$  with coefficients of determination ( $R^2$ ) higher, chi-square ( $\chi^2$ ) values lower than  $0.44 \times 10^{-10}$ , root mean square error ( $RMSE$ ) values lower than  $6.56 \times 10^{-10}$  and mean standard error ( $E$ ) values lower than 16,22 %.

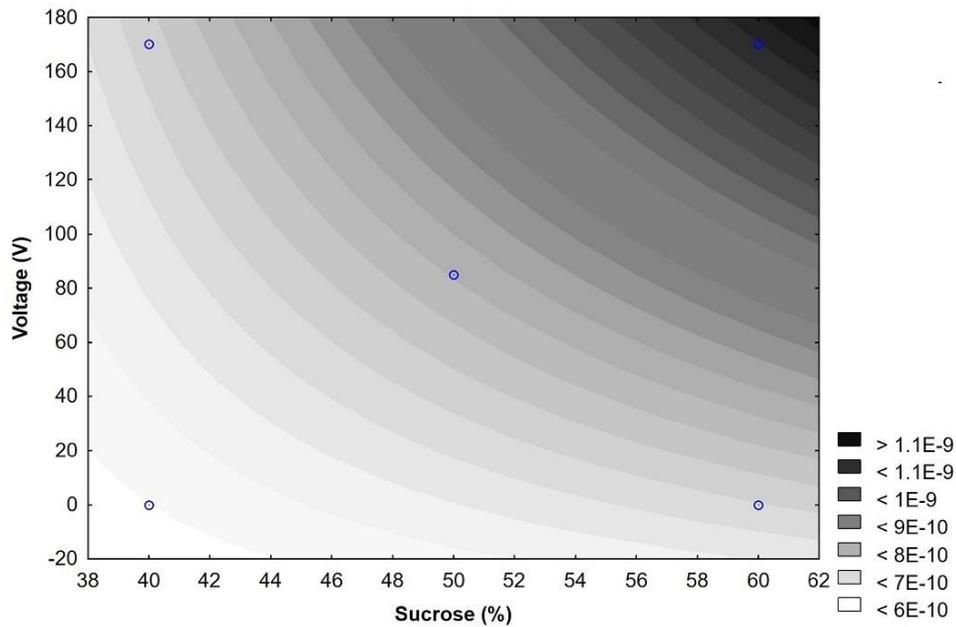


shows  $De^s$  as a function of voltage applied. Simpson *et al.* (2015) found  $De^s$  between  $1.48 \times 10^{-10}$  and  $5.08 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  for sucrose concentration of 45% without and with application of MEF, respectively, during the osmotic dehydration of apples subjected to a moderate electric field.

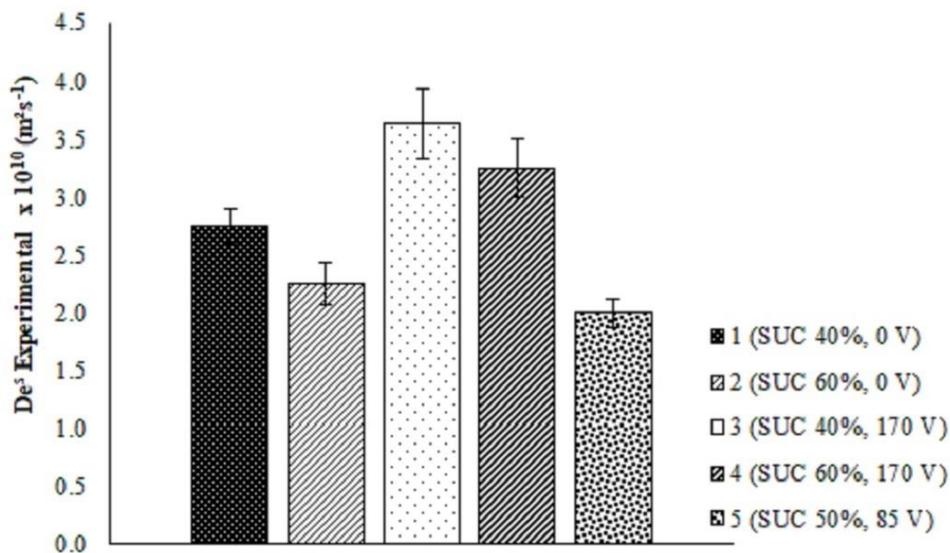
**Table 4.** Effects of the coded independent variables on effective mass diffusivity of water and sucrose and the regression coefficients.

Treat.	$De^s \times 10^{10} (\text{m}^2\text{s}^{-1})$		$R^2$	$\chi^2 \times 1010$	$RMSE \times 1010$	$E$ (%)
	Experimental	Predicted				
1 (SUC 40%, 0 V)	$2.8 \pm 0.2$	2.31	0.99	0.19	0.33	
2 (SUC 60%, 0 V)	$2.2 \pm 0.2$	2.31	0.97	0.03	0.13	
3 (SUC 40%, 170 V)	$3.6 \pm 0.3$	3.24	0.98	0.15	0.34	16.22
4 (SUC 60%, 170 V)	$3.2 \pm 0.2$	3.24	0.97	0.04	0.18	
5 (SUC 50%, 85 V)	$2.0 \pm 0.1$	2.78	0.98	0.44	0.56	

The second Fick's law model was suitable to predict  $De^w$  and  $De^s$  with coefficients of determination ( $R^2$ ) higher, chi-square ( $\chi^2$ ) values lower than  $0.44 \times 10^{-10}$ , root mean square error ( $RMSE$ ) values lower than  $6.56 \times 10^{-10}$  and mean standard error ( $E$ ) values lower than 16,22 %.



**Figure 3.** Contour lines for  $De^w$  as a function of the sucrose concentration (%) and of the voltage (V) applied.

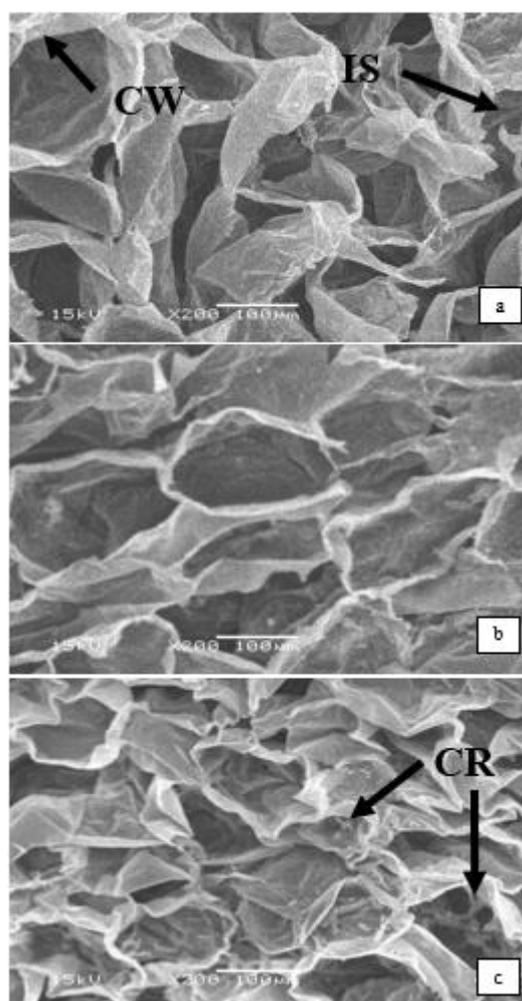


**Figure 4.**  $De^s$  as a function of the voltage (V) applied.

### 3.3 Structural changes

Figure 5 shows the scanning electron microscope (SEM) of apple tissue from fresh (a) and treated (b and c) apples. This analysis was performed only for treatments that showed the highest mass transfer rates (0 V – 60%; 170 V – 60%). According to Fig. 5 (a), fresh apple tissue was found to be well-arranged, orderly structured, consisting of numerous cells and intercellular spaces, such cell walls. The same structure has also been described for tissues of the Fuji apple by SEM (Khin *et al.*, 2007).

The structure of osmotic dehydrated apple cubes without MEF application, shown in Fig. 5 (b), presented cellular collapse, intracellular space expansion and deformation. The walls suffered degradation, and the cells became progressively separated. According to Siddiqui & Bangerth (2017), the degradation of the walls may cause loss of cellular cohesion, fruit firmness and fruit textural quality.



**Figure 5.** Scanning electron microscope (SEM) of apple tissue from fresh and treated apples: (a) fresh control, (b) OD with 60% sucrose concentration and (c) OD/MEF with 60% sucrose concentration and 170V. CW: cell wall; IS: intercellular space; CR: cell rupture.

Apple cubes osmodehydrated with 60% sucrose concentration and 170 V (Fig. 5 (c)) showed the aforementioned changes and also perforated cell walls. This alteration may be explained by the mechanism of electroporation. When cells are permeabilized, channels are opened, allowing diffusion into the tissue. This effect was also reported by Simpson *et al.* (2015) during the osmotic dehydration of apples subjected to a MEF varying from 0 to 17 V cm<sup>-1</sup> and by Moreno *et al.* (2011), who analyzed the influence of ohmic heating (100 V) on the OD kinetics and microstructure of pears.

### 3.4 Texture profile analyses

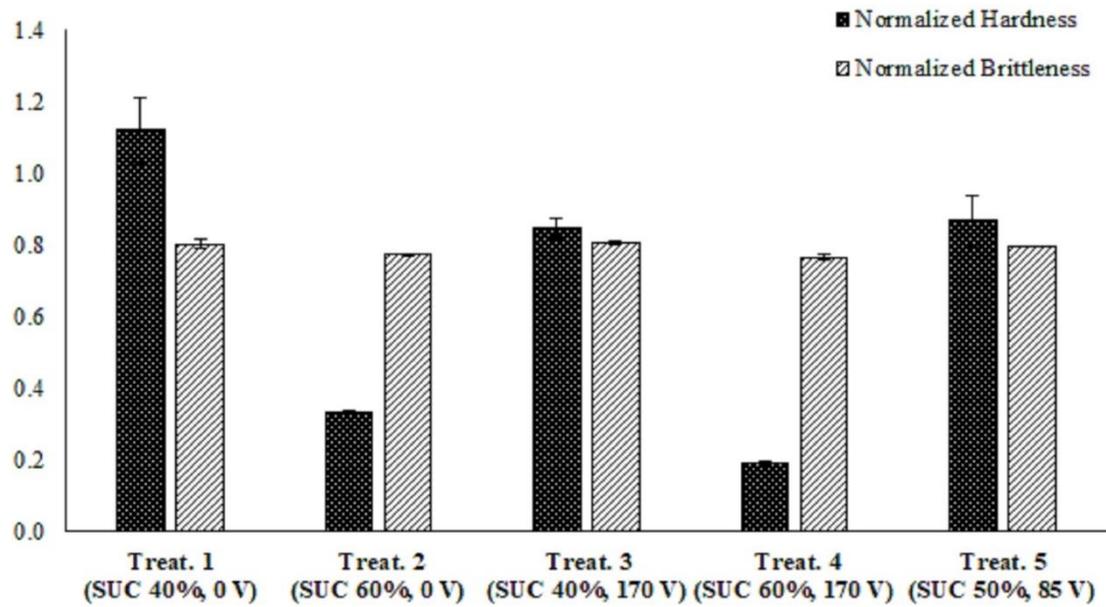
Figure 6 shows the results obtained for hardness and brittleness after 4 hours of OD for all treatments, normalized by the fresh sample hardness. Comparing treatments with 40% *SC* (treatments 1 and 3), hardness decreased with MEF application; the same behavior can be observed for treatments with 60% *SC* (treatments 2 and 4). Table 5 presents the effects of the coded independent variables on normalized hardness, normalized brittleness and color difference. For hardness, all effects were significant at the 95% confidence level; *SC* positively affected this variable; on the other hand, *V* and the interaction between *SC* and *V* negatively affected hardness. Contour lines, presented in Fig. 7, also shows this behavior.

**Table 5.** Effects of the coded independent variables on normalized hardness, brittleness, color difference and regression coefficients.

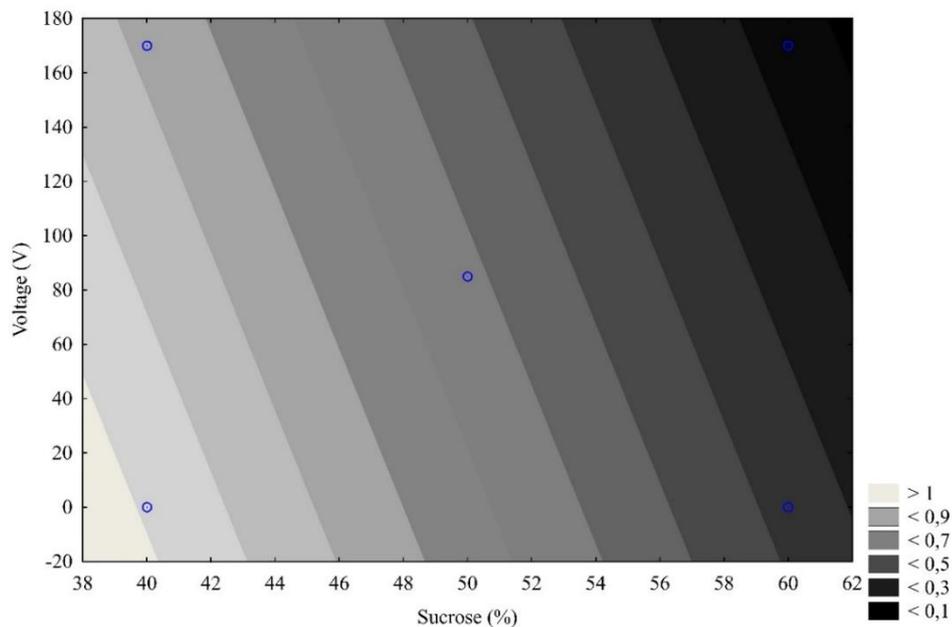
	Effect	<i>p</i>	Regression Coefficient	Effect	<i>p</i>	Regression Coefficient
	Normalized Hardness			$\Delta E$		
Mean	0.622679	0.000003	0.622679*	1.342.491	0.000003	13.42491*
Sucrose concentration	0.488723	0.009503	0.244361*	-341.027	0.045480	-1.70513*
Voltage	-0.721223	0.000040	-0.3606112*	937.709	0.000763	4.68854*
Sucrose conc.x Voltage	-0.209789	0.011182	-0.104894*	-321.217	0.054815	-1.60608
	Normalized Brittleness					
Mean	0.783927	0.000000	0.783927*			
Sucrose concentration	-0.047229	0.001752	-0.023615*			
Voltage	-0.012498	0.169095	-0.006249			
Sucrose conc.x Voltage	-0.016432	0.088383	-0.008216			

According to Khin *et al.* (2007), hardness of the apple tissue is determined by the force exerted on the cell membrane by intracellular fluid; therefore, samples with better structural integrity and/or higher moisture content need an extra force to maintain the water pressure within the cell vacuoles. Samples that were osmotically dehydrated with MEF application had lower moisture content and, therefore, presented higher deformed stress and lower hardness. Figure 6 shows the results found for brittleness after 4 hours of OD for all treatments, normalized by the fresh sample brittleness. It can be seen that brittleness remains practically the same for treatments with 40% *SC* with and without the application of MEF (treatments 1 and 3); the same behavior can be observed for treatments with 60% *SC* (treatments 2 and 4). However, when comparing treatments without application of MEF, as *SC* increases, brittleness decreases; the same result can be observed for treatments with MEF: as *SC* increases,

brittleness decreases. Table 5 shows that the effects of  $V$  and the interaction between  $SC$  and  $V$  were not significant at the 95% confidence level;  $SC$  negatively influenced brittleness.



**Figure 6.** Normalized hardness and brittleness for all treatments.



**Figure 7.** Contour lines for normalized hardness as a function of the sucrose concentration (%) and of the voltage (V) applied.

### 3.5 Color changes

Table 6 shows the color parameters  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  and  $\Delta E$ . For the treatments without MEF application,  $\Delta E$  was practically the same (treatments 1 and 2); when MEF was applied,  $\Delta E$  increased with the increase of  $V$ . According the statistical analysis, shown in **Table 5**, only the

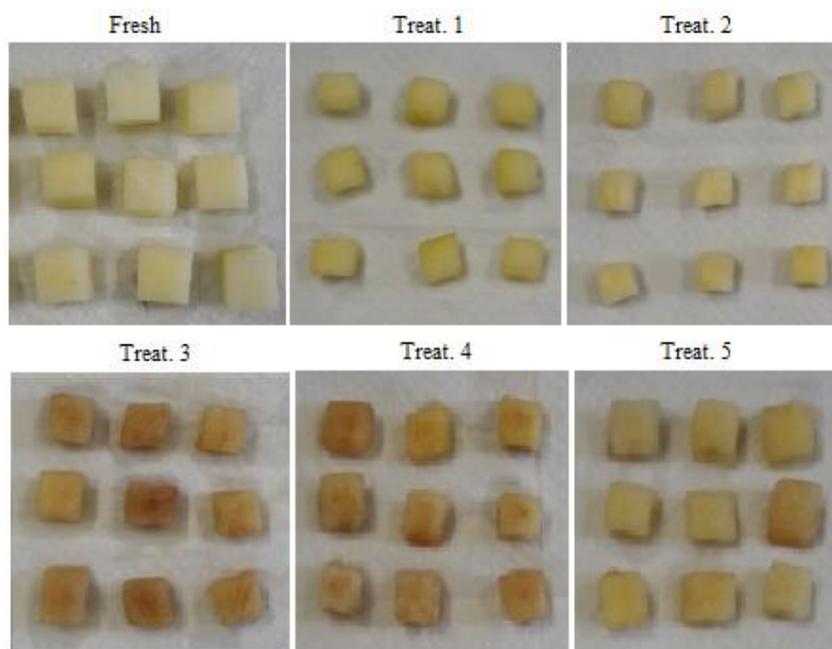
interaction between *SC* and *V* was not significant at the 95% confidence level; *SC* had a negative effect and *V* a positive effect on  $\Delta E$ , indicating that  $\Delta E$  increases with MEF application combined with the decrease of *SC*.

The  $\Delta E$  values were higher than 2 (two), indicating that color differences can be seen by naked eye. Figure 8, which shows photographs of fresh and treated samples, corroborates this finding. In general, the application of MEF changed the color during the OD process, jeopardizing the final visual aspect of the product. This color may related to the enzymatic browning due to polyphenol oxidase activity which could have been accelerated by the external electric field applied. This phenomenon may be avoided by using an antioxidant compound in the osmotic solution.

**Table 6.** Results of the colorimetric analysis for the fresh and treated samples.

Treat.	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
Fresh	$66.8 \pm 1.9$	$-0.6 \pm 0.3$	$11.6 \pm 1.4$	-
1 (SUC 40%, 0 V)	$56.7 \pm 2.2$	$-0.7 \pm 0.3$	$11.4 \pm 2.3$	$9.5 \pm 1.7$
2 (SUC 60%, 0 V)	$55.9 \pm 1.6$	$-0.63 \pm 0.07$	$12.6 \pm 0.5$	$9.28 \pm 1.04$
3 (SUC 40%, 170 V)	$44.2 \pm 1.8$	$3.27 \pm 0.04$	$11.2 \pm 0.2$	$22.1 \pm 1.1$
4 (SUC 60%, 170 V)	$52.5 \pm 0.6$	$1.17 \pm 0.09$	$11.4 \pm 0.6$	$15.4 \pm 1.4$
5 (SUC 50%, 85 V)	$56.0 \pm 1.7$	$0.5 \pm 0.1$	$12.3 \pm 0.2$	$10.86 \pm 1.03$

Moreno *et al.* (2011) studied the effects of pulsed-vacuum and ohmic heating on OD kinetics, on physical properties and on microstructure of apples and concluded that  $\Delta E$  parameter underwent small changes when compared with samples treated only by OD process; however, the application of pulsed-vacuum and ohmic heating caused significant changes of  $\Delta E$  compared to untreated samples.



**Fig. 8.** Photographies of fresh and treated samples.

### 3.6 Reducing Capacity

Table 7 shows the results regarding the reducing capacity of apple samples. This analysis was performed only for treatments that showed the highest mass transfer rates (Treatments 2 (0 V – 60%) and 4 (170 V – 60%)). As can be observed, the reducing capacity for the treatment without application of MEF (treatment 2) was similar to the fresh sample; however, the application of MEF (treatment 4) decreased the reducing capacity of the sample. This decrease could be related with the degradation of phenolic compounds; this reaction may be associated with the color changes aforementioned. According to Kaaber *et al.* (2002) and Kim *et al.* (2001), this reaction is recognized as one of the main problems of fruit and vegetable processing, due to the action of the enzyme polyphenoloxidase, which catalyzes the oxidation of phenolic compounds in dark pigments. This finding negatively impacts the nutritional and sensorial qualities of the product and, as already discussed, may be avoid by using an antioxidant in the osmotic solution.

**Table 7.** Reducing Capacity for fresh and treated apple.

Treat.	Reducing Capacity * (mg GAE / 100 g apple, d.m.)
Fresh	56.6 ± 3.2 <sup>a</sup>
2 (SUC 60%, 0 V)	55.8 ± 4.1 <sup>a</sup>
4 (SUC 60%, 170 V)	36.4 ± 1.8 <sup>b</sup>

\* Different letters indicate significant difference between means ( $p < 0.05$ ).

#### 4. Conclusions

The present study evaluated the osmotic dehydration process assisted by moderate electric field (MEF) applied for apples cubes. Overall, sucrose concentration and voltage of MEF increased water loss and solid gain. The model based on the solution of the Fick's second law was suitable to predict the effective mass diffusivities of water and sucrose. The effective mass diffusivity of water was positively influenced by the concentration of sucrose and the MEF application. On the other hand, the effective mass diffusivity of sucrose was exclusively influenced by the application of MEF, increasing as the applied voltage increases. Therefore, the combined application of osmotic dehydration with MEF resulted in higher mass transfer rates which allows a reduction in the processing time.

The application of MEF caused degradation of the phenolic compounds and a consequent darkening of the apple, impairing its nutritional and visual quality. To overcome this problem it may be suggested the use of antioxidant compounds in the osmotic solution.

Concerning the microstructure of the apple tissue, OD promoted intracellular space expansion and deformation. When combined with MEF, the microstructure showed altered and perforated cell walls, caused by the electroporation mechanism. Overall, the electroporation caused by the electric field increases the mass transfer rates, increasing the effective mass diffusivities. So, the application of MEF is a promising alternative to reduce the processing time, the main drawback of the osmotic dehydration process.

#### References

- Ahmed, I., Qazi, I.M., Jamal, S., 2016. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 34, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.003>
- Allali, H., Marchal, L., Vorobiev, E., 2009. Effect of Blanching by Ohmic Heating on the Osmotic Dehydration Behavior of Apple Cubes. *Drying Technology* 27, 739–746. <https://doi.org/10.1080/07373930902827965>
- AOAC, 1990. *AOAC Official Methods of Analysis*. Association of Official Agricultural Chemists Washington, DC 15th, 136–138.
- Assis, F.R., Morais, R., Morais, A., 2017. Mathematical Modelling of Osmotic Dehydration Kinetics of Apple Cubes. *Journal of Food Processing and Preservation* 41. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12895>
- Coster, H.G.L., 1965. A Quantitative Analysis of the Voltage-Current Relationships of Fixed Charge Membranes and the Associated Property of "Punch-Through." *Biophysical Journal* 5, 669–686. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(65\)86745-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(65)86745-5)
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of Diffusion* 414. [https://doi.org/10.1016/0306-4549\(77\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0306-4549(77)90072-X)
- Dellarosa, N., Ragni, L., Laghi, L., Tylewicz, U., Rocculi, P., Dalla Rosa, M., 2016. Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 37, 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.009>

- Derossi, A., De Pilli, T., Severini, C., McCarthy, M.J., 2008. Mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering* 86, 519–528. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.007>
- Goula, A.M., Kokolaki, M., Daftsiou, E., 2017. Food and Bioproducts Processing Use of ultrasound for osmotic dehydration . The case of potatoes. *Food and Bioproducts Processing* 105, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.07.008>
- Goullieux, A., Pain, J.-P., 2005. Chapter 22: Ohmic Heating, in: Sun, D.W. (Ed.), *Emerging Technologies for Food Processing*. pp. 399–422.
- Kaaber, L., Martinsen, B.K., Bråthen, E., Shomer, I., 2002. Browning Inhibition and Textural Changes of Pre-Peeled Potatoes Caused by Anaerobic Conditions. *LWT - Food Science and Technology* 35, 526–531. <https://doi.org/10.1006/FSTL.2002.0908>
- Khin, M.M., Zhou, W., Perera, C.O., 2007. Impact of process conditions and coatings on the dehydration efficiency and cellular structure of apple tissue during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering* 79, 817–827. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.046>
- Kim, J.Y., Seo, Y.S., Kim, J.E., Sung, S.-K., Song, K.J., An, G., Kim, W.T., 2001. Two polyphenol oxidases are differentially expressed during vegetative and reproductive development and in response to wounding in the Fuji apple. *Plant Science* 161, 1145–1152. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00522-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00522-2)
- Kulshrestha, S., Sastry, S., 2003. Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 4, 189–194. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00003-1)
- Liu, Y., Ying, Y., Yu, H., Fu, X., 2006. Comparison of the HPLC method and FT-NIR analysis for quantification of glucose, fructose, and sucrose in intact apple fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 2810–2815. <https://doi.org/10.1021/jf052889e>
- Moreno, J., Simpson, R., Estrada, D., Lorenzen, S., Moraga, D., Almonacid, S., 2011. Effect of pulsed-vacuum and ohmic heating on the osmodehydration kinetics , physical properties and microstructure of apples ( cv . Granny Smith ). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 12, 562–568. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.06.011>
- Moreno, J., Simpson, R., Sayas, M., Segura, I., Aldana, O., Almonacid, S., 2011. Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packham’s Triumph). *Journal of Food Engineering* 104, 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.029>
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Tappi, S., Siroli, L., Lanciotti, R., Romani, S., 2018. Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries ( *Vaccinium oxycoccus* ): Study on quality parameters evolution during storage. *Food Control* 93, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.05.005>
- Peleg, A., 1988. An Empirical Model for the Description Moisture Sorption Curves. *Journal of Food Science* 53, 1216–1217.
- Saravacos, G.D., Maroulis, Z.B., 2011. *Transport Properties of Foods*.
- Sastry, S.K., 2008. Ohmic Heating and Moderate Electric Field Processing. *Food Science and Technology International* 14, 419–422. <https://doi.org/10.1177/1082013208098813>
- Siddiqui, S., Bangerth, F., 2017. The effect of calcium infiltration on structural changes in cell walls of stored apples The effect of calcium infiltration on structural changes in cell walls of stored apples. *Journal of Horticultural Science* 71, 703–708. <https://doi.org/10.1080/14620316.1996.11515450>
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H., Jaques, A., 2015. Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering* 166, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>
- Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16.
- Wayne, R., 2014. Preface to the Second Edition, *Light and Video Microscopy*. <https://doi.org/10.1080/14756366.2016.1201813>
- Weaver, J.C., Chizmadzhev, Y.A., 1996. Theory of electroporation: A review. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 41, 135–160. [https://doi.org/10.1016/S0302-4598\(96\)05062-3](https://doi.org/10.1016/S0302-4598(96)05062-3)

## 4.2 Resultados Complementares

### 4.2.1 Teor de Umidade no Equilíbrio

Durante o processo de desidratação osmótica da maçã, o teor de umidade ( $x^w$  - g água por g sólidos secos) das amostras em diferentes tempos de imersão foi experimentalmente obtido para os 5 tratamentos realizados em duplicata, de acordo com a Tabela 4.1. As análises para determinação do teor de umidade foram realizadas em triplicata para cada tempo de imersão em cada tratamento.

Tabela 4.1 - Teor de umidade (g água por g sólidos secos) das amostras para os diferentes tratamentos

Tempo de DO (min)	Trat. 1 (SAC 40%, 0V)	Trat. 2 (SAC 60%, 0V)	Trat. 3 (SAC 40%, 170V)	Trat. 4 (SAC 60%, 170V)	Trat. 5 (SAC 50%, 85V)
0	6,811 ± 0,009	7,0 ± 0,0	7,4 ± 0,3	7,5 ± 0,0	6,8 ± 0,1
20	3,46 ± 0,02	2,6 ± 0,2	3,1 ± 0,2	1,8 ± 0,1	2,9 ± 0,1
40	3,02 ± 0,05	1,93 ± 0,04	2,7 ± 0,1	1,55 ± 0,03	2,3 ± 0,1
80	2,619 ± 0,001	1,542 ± 0,002	2,25 ± 0,04	1,13 ± 0,01	1,91 ± 0,03
120	2,393 ± 0,009	1,26 ± 0,02	2,09 ± 0,06	1,013 ± 0,003	1,69 ± 0,08
180	2,135 ± 0,005	1,05 ± 0,04	1,83 ± 0,02	0,885 ± 0,002	1,44 ± 0,07
240	1,967 ± 0,006	0,928 ± 0,005	1,734 ± 0,005	0,86 ± 0,02	1,279 ± 0,002

Os conteúdos de umidade de cada experimento estão plotados em função do tempo de imersão na Figura 4.1. Os valores foram normalizados ( $x_t^w/x_0^w$ ) a fim de possibilitar uma melhor comparação dos resultados experimentais ( $x_t^w$  e  $x_0^w$  representam o teor de umidade de uma amostra no tempo  $t$  de desidratação e no início do processamento, respectivamente). Os pontos foram unidos por linhas para uma melhor visualização da tendência das curvas.

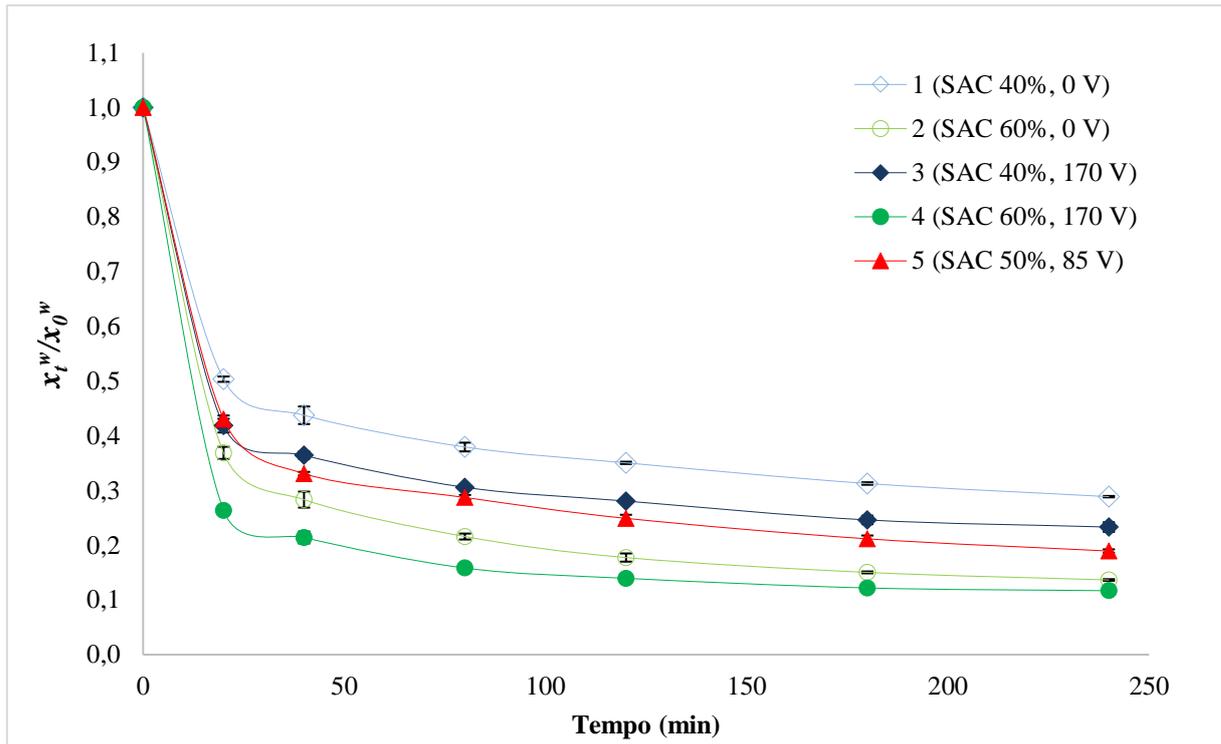


Figura 4.1 - Variação adimensional do teor de umidade em função do tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de maçã

Através dos resultados apresentados na Figura 4.1, é possível observar que no início do processo de DO tem-se uma alta taxa de remoção de água e que, à medida que o tempo passa, a taxa de remoção torna-se mais lenta. Taxas elevadas de remoção de água no início da desidratação devem-se à grande força motriz osmótica inicial existente entre a seiva da fruta fresca e o meio hipertônico que vai diminuindo com o passar do tempo.

Ao se comparar a curva obtida para os tratamentos 1 e 3, concentração de sacarose de 40% com e sem aplicação de MEF, percebe-se que ocorre um maior decréscimo do teor de umidade ao aplicar-se MEF. O mesmo comportamento pode ser visualizado quando os tratamentos 2 e 4 são comparados, concentração de sacarose de 60% com e sem aplicação de MEF. A curva do tratamento 5, que representa o ponto central do planejamento, encontra-se exatamente entre os demais resultados encontrados. Portanto, as curvas de desidratação da Figura 4.1 indicam que o aumento da concentração de sacarose (%) e a aplicação do MEF contribuem para o decréscimo do teor de umidade das maçãs. SIMPSON *et al.*, (2015) também concluíram que o efeito combinado de DO com MEF em fatias de maçã *Granny Smith* produz uma aceleração no processo de transferência de massa.

Além disso, a partir da Figura 4.1, pode-se concluir que as condições de equilíbrio não foram totalmente alcançadas durante as 4 horas de processamento, pois não é possível observar

uma porção de zona levemente assintota nas curvas, típica da condição de equilíbrio. Portanto, os valores de taxa inicial de transferência de água ( $N_0^W$  - g água por g sólidos secos  $s^{-1}$ ) e de concentração de equilíbrio ( $x_\infty^W$  - g água por g sólidos secos) foram obtidos ajustando os dados experimentais à equação de Peleg (Equação 2.5) e estão apresentados na Tabela 4.2. Para todos os tratamentos, o coeficiente de determinação foi superior a 0,99, indicando que o modelo previu satisfatoriamente a taxa inicial de transferência de massa da água e a concentração de equilíbrio.

Tabela 4.2 - Dados experimentais do teor de umidade ajustados ao modelo de PELEG (1988)

<b>Tratamento</b>	$k_2$	$k_1$	$R^2$	$N_0^W \times 10^2$ ( $s^{-1}$ )	$x_\infty^W$
<b>1A (SAC 40%, 0 V)</b>	0,197	2,79	0,999	35,89	1,735
<b>1B (SAC 40%, 0 V)</b>	0,198	2,72	0,999	36,73	1,759
<b>2A (SAC 60%, 0 V)</b>	0,151	1,53	1,000	65,20	0,697
<b>2B (SAC 60%, 0 V)</b>	0,156	1,53	1,000	65,43	0,698
<b>3A (SAC 40%, 170 V)</b>	0,179	1,56	1,000	63,96	1,563
<b>3B (SAC 40%, 170 V)</b>	0,160	1,68	0,999	59,51	1,514
<b>4A (SAC 60%, 170 V)</b>	0,158	0,86	1,000	115,72	0,726
<b>4B (SAC 60%, 170 V)</b>	0,148	0,68	1,000	147,05	0,720
<b>5A (SAC 50%, 85 V)</b>	0,178	2,02	1,000	49,44	1,053
<b>5B (SAC 50%, 85 V)</b>	0,170	2,27	0,999	44,04	1,043

Para avaliar os resultados obtidos para o teor de umidade no equilíbrio ( $x_\infty^W$ ) foi realizada uma análise estatística. Inicialmente, foi avaliada a influência da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada sobre essa variável. Foram calculados os efeitos dos fatores lineares e da interação sobre a variável de resposta, assim como o erro puro, o coeficiente  $t$  e a significância estatística ( $p$ ), conforme mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre o teor de umidade no equilíbrio.

<b>Fatores</b>	<b>Efeito Estimado</b>	<b>Erro Puro</b>	$t(5)$	$p$
<b>Média*</b>	1,150787	0,005565	206,7963	0,000000
<b>Conc. sacarose*</b>	-0,932279	0,012443	-74,9219	0,000000
<b>Tensão elétrica*</b>	-0,091586	0,012443	-7,3602	0,000727
<b>Conc. sac. x tensão elétrica*</b>	0,117108	0,012443	9,4113	0,000229

\*Significativo ( $p < 0,05$ )

Conforme a Tabela 4.3, pode-se verificar que todos os fatores foram significativos para  $x_\infty^W$  ao nível de confiança de 95%. Também é possível concluir que a concentração de sacarose e a tensão elétrica exercem um efeito negativo sobre  $x_\infty^W$ ; entretanto, a interação entre a concentração de sacarose e tensão elétrica exercem efeito positivo. Dentre os fatores

significativos, a concentração de sacarose (%) apresentou o menor valor  $p$  e o maior valor  $t$ , mostrando ser a variável que mais influencia o teor de umidade no equilíbrio.

Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar a significância da regressão e a falta de ajuste do modelo completo, a um nível de confiança de 95%. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice B. Pode-se verificar, através do teste de F, que o modelo apresentou regressão significativa ( $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ ). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido para o modelo foi de 0,9846, indicando que o modelo explicou 98,46% da variação dos dados observados.

O modelo com variáveis codificadas que representa o teor de umidade no equilíbrio, dentro dos limites da concentração de sacarose (%) da solução e da tensão elétrica (V) aplicada, é representado pela Equação 4.1:

$$x_{\infty}^w = 3,820047 - 0,052469x_1 - 0,003983x_2 + 0,000069x_1x_2 \quad (4.1)$$

A Tabela 4.4 mostra os valores do teor de umidade no equilíbrio ( $x_{\infty}^w$ ) obtidos a partir do modelo de Peleg e previstos através do planejamento experimental, além dos parâmetros  $R^2$ ,  $\chi^2$  (eq. 3.8),  $RMSE$  (eq. 3.9) e  $E$  (%) (eq. 3.10), para todos os tratamentos. Avaliando os valores obtidos para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e os erros estatísticos ( $\chi^2$ ,  $RMSE$  e  $E$ ), pode-se inferir que o modelo analisado se mostra satisfatório para o ajuste dos dados experimentais, uma vez que os valores para o  $R^2$  são muito próximos a um (1) e os erros estatísticos são baixos. De acordo com Neto, Scarminio e Bruns, (1996), valores de erro médio abaixo de 10 % indicam um ajuste adequado para propósitos práticos.

Tabela 4.4 – Teor de umidade experimental e previsto no equilíbrio para todos os tratamentos.

<b>Tratamento</b>	<b>Experimental</b>	<b>Previsto</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b><math>RMSE</math></b>	<b><math>E</math> (%)</b>
<b>1 (SAC 40%, 0 V)</b>	1,75 ± 0,01	1,721	0,999	0,001	0,020	
<b>2 (SAC 60%, 0 V)</b>	0,7 ± 0,0	0,672	1,000	0,002	0,018	
<b>3 (SAC 40%, 170 V)</b>	1,54 ± 0,03	1,513	1,000	0,002	0,025	4,03
<b>4 (SAC 60%, 170 V)</b>	0,723 ± 0,003	0,697	1,000	0,002	0,018	
<b>5 (SAC 50%, 85 V)</b>	1,048 ± 0,005	1,151	0,999	0,018	0,073	

Além disso, é possível perceber que os menores teores de umidade no equilíbrio são atingidos com solução de sacarose de 60% com e sem aplicação de MEF; entretanto, ao aplicar o MEF ocorre um leve acréscimo no  $x_{\infty}^w$ , que pode ser explicado pelo efeito positivo que a interação entre concentração de sacarose e tensão elétrica causa no teor da umidade de

equilíbrio. O mesmo resultado pode ser observado para os tratamentos 1 e 3, que foram realizados com solução de sacarose de 40%.

Os valores do teor de umidade no equilíbrio ( $x_{\infty}^w$ ), obtidos a partir do modelo de Peleg e previstos através do planejamento experimental, também podem ser visualizados através da Figura 4.2 onde a linha contínua representa os valores teóricos de  $x_{\infty}^w$  e os pontos representam os valores experimentais.

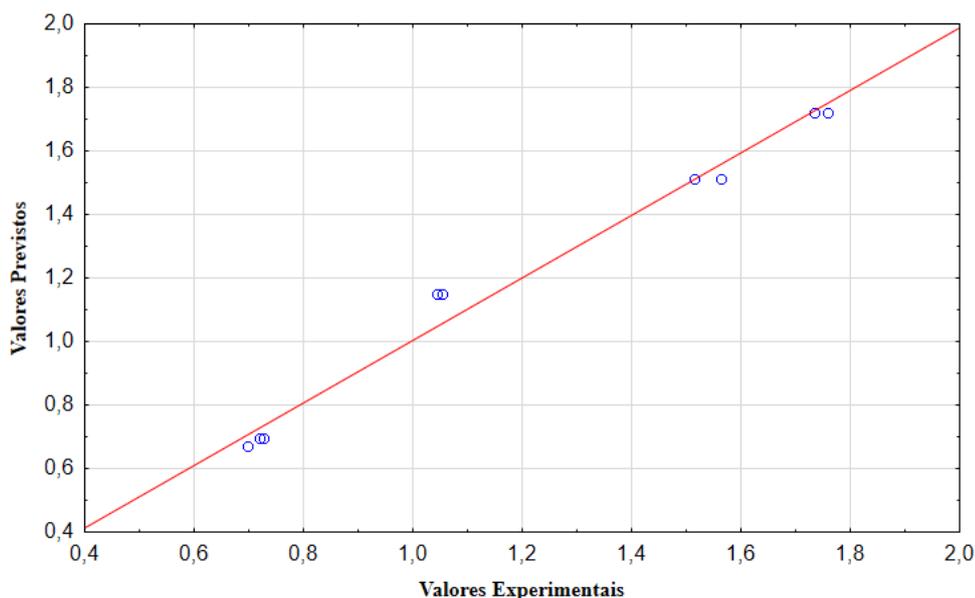


Figura 4.2 - Valores experimentais em função dos valores previstos para  $x_{\infty}^w$

A Figura 4.3 apresenta as linhas de contorno para o teor de umidade no equilíbrio ( $x_{\infty}^w$ ) em função da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada, com concentração de sacarose da solução osmótica variando de 40 a 60% e tensão elétrica aplicada de 0 a 170 V. Como pode ser observado, o teor de umidade no equilíbrio é influenciado principalmente pela concentração de sacarose e de forma menos relevante pela aplicação de MEF, sendo que o MEF causa maior influência nos tratamentos com teor de sacarose de 40%. Isso pode ser explicado pelo efeito positivo que a interação entre concentração de sacarose e tensão elétrica causa no teor da umidade de equilíbrio.

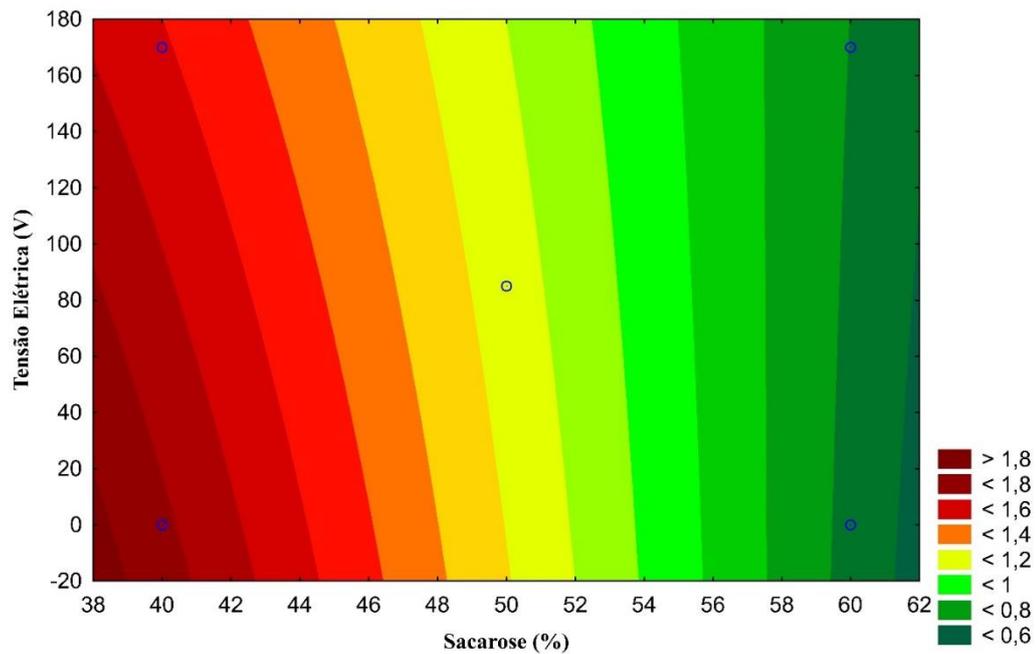


Figura 4.3 - Linhas de contorno para o teor de umidade no equilíbrio ( $x_{\infty}^W$ ) em função da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada.

#### 4.2.2 Teor de Sacarose no Equilíbrio

Durante a desidratação osmótica da maçã, o teor de sacarose das amostras em diferentes tempos de imersão foi experimentalmente obtido através da análise de sólidos solúveis ( $x^{ss}$  - °Brix) e por HPLC ( $x^s$  - g de sacarose por 100 g de amostra) para os 5 tratamentos realizados, de acordo com os resultados apresentados no Apêndice A.

O teor de açúcar das amostras osmodesidratadas foi determinado por diferentes métodos com o objetivo de verificar a correlação existente entre os dados de incorporação de sólidos solúveis obtidos por refratômetro e os dados de incorporação de sacarose obtidos pela análise de HPLC; a determinação do conteúdo de açúcares utilizando HPLC demanda maior tempo e sua determinação tem um elevado custo de aquisição e manutenção quando comparada a um refratômetro. Para efeito de comparação entre os diferentes métodos, os resultados das análises de sólidos solúveis e incorporação de sacarose por HPLC foram normalizados ( $x_t^{ss}/x_0^{ss}$  e  $x_t^s/x_0^s$ ), sendo  $x^{ss}$  e  $x^s$  os teores de sólidos solúveis e de sacarose das amostras, respectivamente. Esses resultados, para os dois métodos de determinação, estão apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 - Teor de sólidos solúveis (°Brix) determinado por refratômetro

Tempo de DO (min)	Trat. 1 (SAC 40%, 0V)	Trat. 2 (SAC 60%, 0V)	Trat. 3 (SAC 40%, 170V)	Trat. 4 (SAC 60%, 170V)	Trat. 5 (SAC 50%, 85V)
0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0
20	2,1 ± 0,1	2,5 ± 0,2	2,10 ± 0,01	2,82 ± 0,06	2,4 ± 0,2
40	2,34 ± 0,08	3,0 ± 0,1	2,42 ± 0,02	3,14 ± 0,05	2,7 ± 0,2
80	2,4 ± 0,1	3,66 ± 0,07	2,62 ± 0,02	3,71 ± 0,09	3,31 ± 0,09
120	2,58 ± 0,05	4,1 ± 0,2	2,86 ± 0,02	4,33 ± 0,02	3,54 ± 0,08
180	2,64 ± 0,05	4,37 ± 0,08	2,9 ± 0,1	4,59 ± 0,08	4,16 ± 0,05
240	2,8 ± 0,1	4,7 ± 0,1	3,09 ± 0,08	4,64 ± 0,02	4,3 ± 0,1

Tabela 4.6 - Teor de sacarose (g de sacarose por 100 g de amostra) determinado pela análise de HPLC

Tempo de DO (min)	Trat. 1 (SAC 40%, 0V)	Trat. 2 (SAC 60%, 0V)	Trat. 3 (SAC 40%, 170V)	Trat. 4 (SAC 60%, 170V)	Trat. 5 (SAC 50%, 85V)
0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0
20	1,75 ± 0,06	2,3 ± 0,1	2,01 ± 0,09	2,56 ± 0,09	1,83 ± 0,05
40	1,97 ± 0,07	2,7 ± 0,2	2,18 ± 0,05	3,01 ± 0,09	2,2 ± 0,2
80	2,41 ± 0,02	3,3 ± 0,1	2,6 ± 0,0	4,1 ± 0,2	2,6 ± 0,1
120	2,54 ± 0,01	3,9 ± 0,1	2,78 ± 0,08	4,18 ± 0,09	2,9 ± 0,2
180	2,61 ± 0,01	4,24 ± 0,09	3,01 ± 0,05	4,47 ± 0,01	3,2 ± 0,1
240	2,88 ± 0,02	4,7 ± 0,1	3,1 ± 0,0	4,88 ± 0,08	3,4 ± 0,2

Para verificar a correlação existente entre os dados de incorporação de sólidos solúveis (refratômetro) e os dados de incorporação de açúcar (HPLC) durante o processo de desidratação osmótica foi realizada uma correlação linear entre os resultados obtidos para os dois métodos. O resultado das correlações obtidas para todos os tratamentos está apresentado na Tabela 4.7. Verifica-se que existe uma boa correlação entre os dois métodos utilizados, uma vez que os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram superiores a 0,90 para todos os tratamentos. Portanto, utilizar o método de determinação de açúcares através de refratômetro em substituição ao HPLC é totalmente viável, pois representa menores custos em termos de aquisição e manutenção e mais rapidez e simplicidade na quantificação, além de dispensar a utilização de reagentes.

Tabela 4.7 - Correlação entre o resultado da análise de incorporação de sólidos utilizando refratômetro e HPLC.

Tratamento	Equação da reta	$R^2$
1 (SAC 40%, 0 V)	$y = 1,01826x - 0,13748$	0,920
2 (SAC 60%, 0 V)	$y = 0,98409x - 0,1154$	0,989
3 (SAC 40%, 170 V)	$y = 1,01777x - 0,08425$	0,977
4 (SAC 60%, 170 V)	$y = 1,03112x - 0,11278$	0,970
5 (SAC 50%, 85 V)	$y = 0,74095x + 0,17302$	0,990

A Figura 4.4 apresenta os valores de teor de sacarose de cada curva de desidratação em função do tempo de imersão. Para obtenção das curvas foram utilizados os valores normalizados ( $x_t^s/x_0^s$ ) dos resultados obtidos a partir da análise de HPLC. Cabe salientar que para os resultados posteriores também serão utilizados os resultados provenientes das análises de HPLC. Novamente, os pontos experimentais foram unidos por linhas para visualização da tendência das curvas.

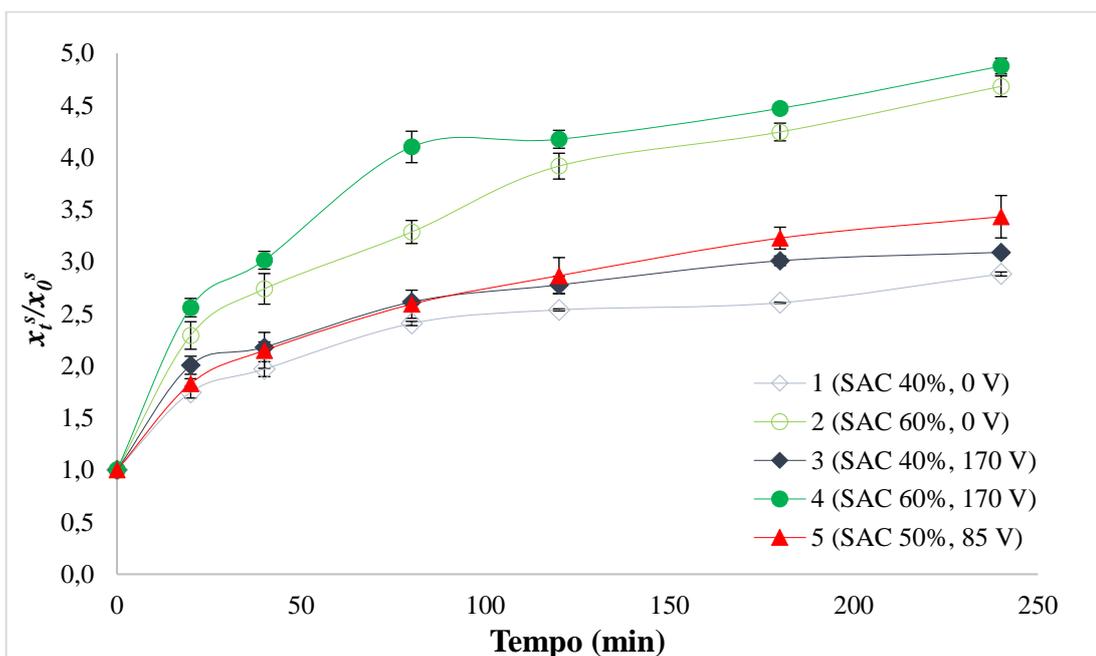


Figura 4.4 - Variação adimensional do teor de sacarose em função do tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de maçã

Os resultados indicam que no início do processo de DO tem-se uma alta taxa de incorporação de sacarose e que, com o passar do tempo, essa taxa torna-se mais lenta. Ao se comparar as curvas obtidas para os tratamentos 1 e 3, solução osmótica de 40% de sacarose com e sem aplicação de MEF, pode-se perceber que ocorre um aumento na incorporação de sacarose ao aplicar-se MEF. Para as curvas obtidas para os tratamentos 2 e 4, solução osmótica de 60% de sacarose com e sem aplicação de MEF, também ocorre um aumento na incorporação

de sacarose ao aplicar-se MEF; entretanto, ao final das 4 horas de processamento a incorporação é praticamente a mesma. A curva do tratamento 5 (SAC 50%, 85 V), que representa o ponto central do planejamento, encontra-se inicialmente sobreposta à curva do tratamento 3 (SAC 40%, 170 V), porém ao longo das 4 horas de processamento, aumenta a incorporação de sacarose, ficando levemente superior à curva do tratamento 3. Isso indica que tanto o teor de sacarose da solução osmótica quanto a aplicação de MEF influenciam na incorporação de sacarose.

Allali, Marchal e Vorobiev (2009) estudaram o efeito do branqueamento por aquecimento ôhmico (OH) no dano dos tecidos da maçã e na cinética de desidratação osmótica. No estudo, cubos de maçã foram aquecidos ohmicamente em várias escalas de branqueamento e, após o resfriamento, as amostras tratadas foram osmodesidratadas. Os autores concluíram que o aquecimento ôhmico, mesmo que para tratamentos curtos, impacta em mudanças significativas na estrutura celular das maçãs e contribui para o aumento da transferência de massa durante a desidratação osmótica.

A análise das curvas apresentadas na Figura 4.4 demonstra que as condições de equilíbrio não foram totalmente alcançadas durante as 4 horas de processamento. Portanto, os valores de taxa inicial de transferência de sacarose ( $N_0^s$ - g de sacarose por 100 g de amostra  $s^{-1}$ ) e concentração de equilíbrio ( $x_\infty^s$ - g sacarose por 100 g de amostra) foram obtidos ajustando os dados experimentais à equação de Peleg e estão apresentados na Tabela 4.8. Para todos os tratamentos, o coeficiente de determinação foi superior a 0,98, indicando que o modelo previu satisfatoriamente a taxa inicial de transferência de massa da sacarose e a concentração de equilíbrio.

Tabela 4.8 - Dados experimentais do teor de sacarose ajustados ao modelo de PELEG (1988)

<b>Tratamento</b>	$k_2$	$k_1$	$R^2$	$N_0^s \times 10^2 (s^{-1})$	$x_\infty^s$
<b>1A (SAC 40%, 0 V)</b>	0,047	2,20	0,993	45,41	31,261
<b>1B (SAC 40%, 0 V)</b>	0,047	2,28	0,994	43,80	30,936
<b>2A (SAC 60%, 0 V)</b>	0,023	1,45	0,977	68,89	52,144
<b>2B (SAC 60%, 0 V)</b>	0,023	1,67	0,980	60,02	53,593
<b>3A (SAC 40%, 170 V)</b>	0,040	1,62	0,994	61,67	35,479
<b>3B (SAC 40%, 170 V)</b>	0,043	1,39	0,996	72,00	32,711
<b>4A (SAC 60%, 170 V)</b>	0,024	1,12	0,994	88,91	50,629
<b>4B (SAC 60%, 170 V)</b>	0,025	0,97	0,990	103,04	48,790
<b>5A (SAC 50%, 85 V)</b>	0,029	1,77	0,991	56,41	44,873
<b>5B (SAC 50%, 85 V)</b>	0,033	2,29	0,983	43,70	41,011

A análise estatística dos resultados está apresentada na Tabela 4.9. Somente os efeitos da concentração de sacarose e da interação entre a concentração de sacarose e a tensão elétrica foram significativos para  $x_{\infty}^S$  ao nível de confiança de 95%. Também é possível concluir que a concentração de sacarose exerce um efeito positivo sobre  $x_{\infty}^S$  e que a interação entre a concentração de sacarose e a tensão elétrica exerce efeito negativo. A concentração de sacarose apresentou o menor valor  $p$  e o maior valor  $t$ , mostrando ser a variável que mais influencia o teor de sacarose no equilíbrio.

Tabela 4.9 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre o teor de sacarose no equilíbrio.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Puro	$t(5)$	$p$
Média*	42,142668	0,530648	79,4174	0,000000
Conc. sacarose*	18,692144	1,186564	15,7532	0,000019
Tensão elétrica	-0,081459	1,186564	-0,0687	0,947928
Conc. sac. x tensão elétrica*	-3,077901	1,186564	-2,5940	0,048603

\*Significativo ( $p < 0,05$ )

A análise de variância (ANOVA), apresentada no Apêndice B, indicou que o modelo reduzido apresentou regressão significativa ( $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ ). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido foi de 0,979, indicando que o modelo, apresentado na Equação 4.2, explicou 97,9% da variação dos dados observados:

$$x_{\infty}^S = -4,58769 + 0,94131x_1 - 0,00008x_1x_2 \quad (4.2)$$

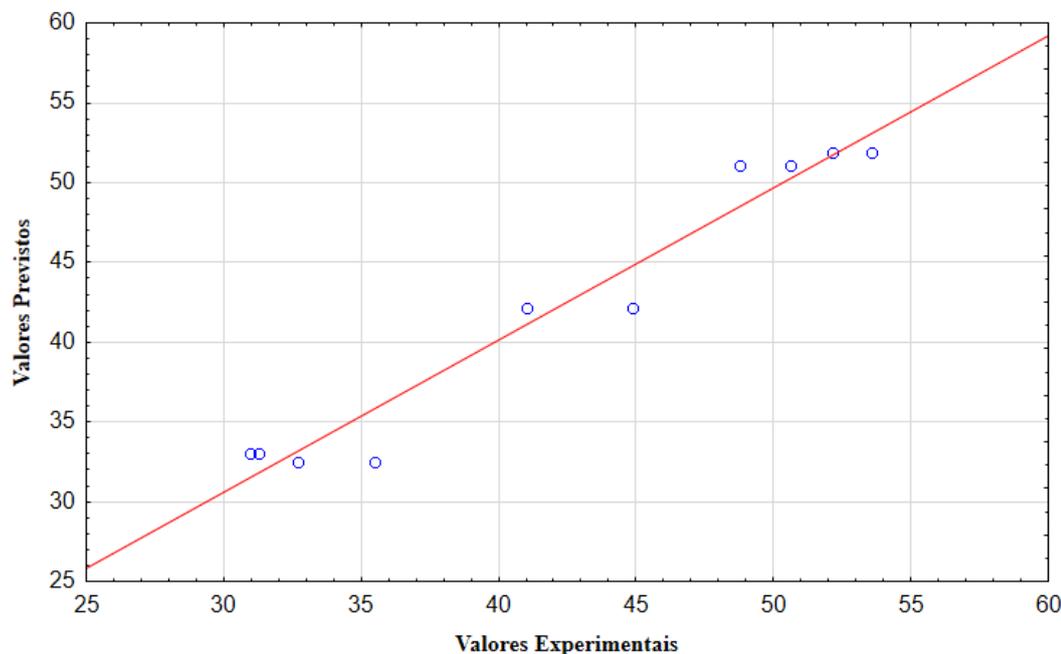
A Tabela 4.10 mostra os valores do teor de sacarose no equilíbrio ( $x_{\infty}^S$ ) obtidos a partir do modelo de Peleg e previstos através do planejamento experimental juntamente com os parâmetros que avaliam a qualidade do ajuste. Observa-se que os menores teores de sacarose no equilíbrio são atingidos com solução de sacarose de 40% com e sem aplicação de MEF; entretanto, ao aplicar-se MEF, ocorre um leve acréscimo no  $x_{\infty}^S$ . Este resultado não pode ser explicado pela equação que representa o modelo, pois ao aplicar-se MEF é esperado um decréscimo no  $x_{\infty}^S$ , já que a interação entre a concentração de sacarose e a tensão elétrica exercem efeito negativo sobre o teor de sacarose no equilíbrio. Este comportamento pode ser explicado por erros experimentais decorridos durante a realização da desidratação osmótica, como, por exemplo, danificação de algum cubo durante o processamento.

Tabela 4.10 - Teor de sacarose experimental e previsto no equilíbrio.

Tratamento	Experimental	Previsto	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	E(%)
1 (SAC 40%, 0 V)	31,1 ± 0,2	33,065	0,999	0,235	1,395	
2 (SAC 60%, 0 V)	52,9 ± 0,7	51,891	1,000	0,057	0,861	3,96
3 (SAC 40%, 170 V)	34,1 ± 1,4	32,529	1,000	0,269	1,478	
4 (SAC 60%, 170 V)	49,7 ± 0,9	51,087	1,000	0,107	1,171	
5 (SAC 50%, 85 V)	42,9 ± 1,9	42,143	0,999	0,207	1,478	

Ao se comparar os teores de sacarose no equilíbrio para os tratamentos com solução de sacarose de 60%, percebe-se um decréscimo na incorporação de sacarose ao aplicar-se MEF, que pode ser explicado pelo efeito negativo que a interação entre a concentração de sacarose e a tensão elétrica exercem sobre o teor de sacarose no equilíbrio. Os valores do teor de sacarose no equilíbrio ( $x_{\infty}^S$ ), obtidos a partir do modelo de Peleg e previstos através do planejamento experimental, também podem ser visualizados através da Figura 4.5. A linha contínua representa os valores teóricos de  $x_{\infty}^S$  e os pontos representam os valores experimentais.

Avaliando os valores obtidos para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e os erros estatísticos ( $\chi^2$ ,  $RMSE$  e  $E$ ) pode-se inferir que o modelo analisado se mostra satisfatório para o ajuste dos dados experimentais.

Figura 4.5 - Valores experimentais em função dos valores previstos para  $x_{\infty}^S$ 

A Figura 4.6 apresenta as linhas de contorno para o teor de sacarose no equilíbrio ( $x_{\infty}^S$ ) em função da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada. Pode-se observar que o teor de sacarose no equilíbrio é influenciado, principalmente, pelo teor da solução de

sacarose e, em menor intensidade, pela interação entre os dois fatores. Assim, a aplicação de MEF mostra-se interessante uma vez que sua aplicação causa decréscimo na incorporação de sacarose, fenômeno desejável do ponto de vista de mercado consumidor, que demanda, cada vez mais, de produtos com baixo teor de açúcar.

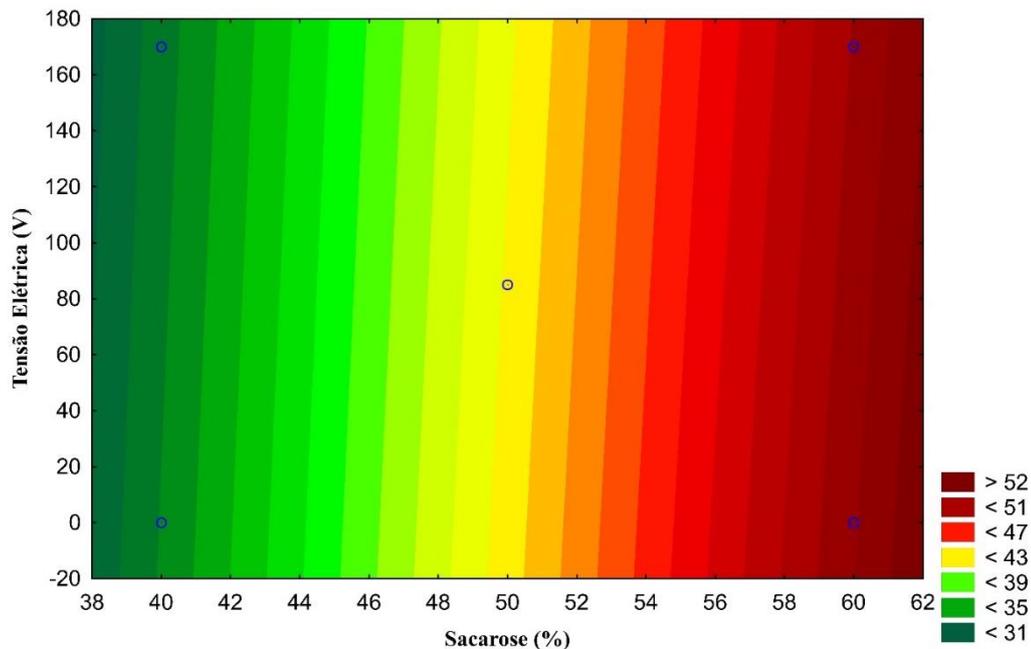


Figura 4.6 - Linhas de contorno para o teor de sacarose no equilíbrio ( $x_{\infty}^S$ ) em função da tensão elétrica (V) aplicada e da concentração de sacarose (%).

#### 4.2.3 Textura

Os resultados obtidos para a textura foram discutidos em duas partes, a primeira, referente à dureza e fragilidade encontra-se no artigo do item 4.1; a segunda parte, pertinente à coesão e à elasticidade, encontra-se a seguir.

A Figura 4.7 mostra os resultados obtidos para a coesão após 4 horas de DO para todos os tratamentos; os valores foram normalizados (coesão/coesão inicial) para permitir uma melhor comparação dos resultados experimentais. Para os tratamentos com 40% de sacarose (tratamento 1 e 3), a coesão normalizada permanece praticamente inalterada com a aplicação do MEF; entretanto, quando se compara os resultados para os tratamentos com 60% de sacarose, percebe-se um decréscimo da coesão normalizada com a aplicação de MEF. Através da comparação entre os tratamentos 1 e 2 e dos tratamentos 3, 4 e 5, também é possível visualizar que o aumento da concentração de sacarose provoca aumento da coesão normalizada.

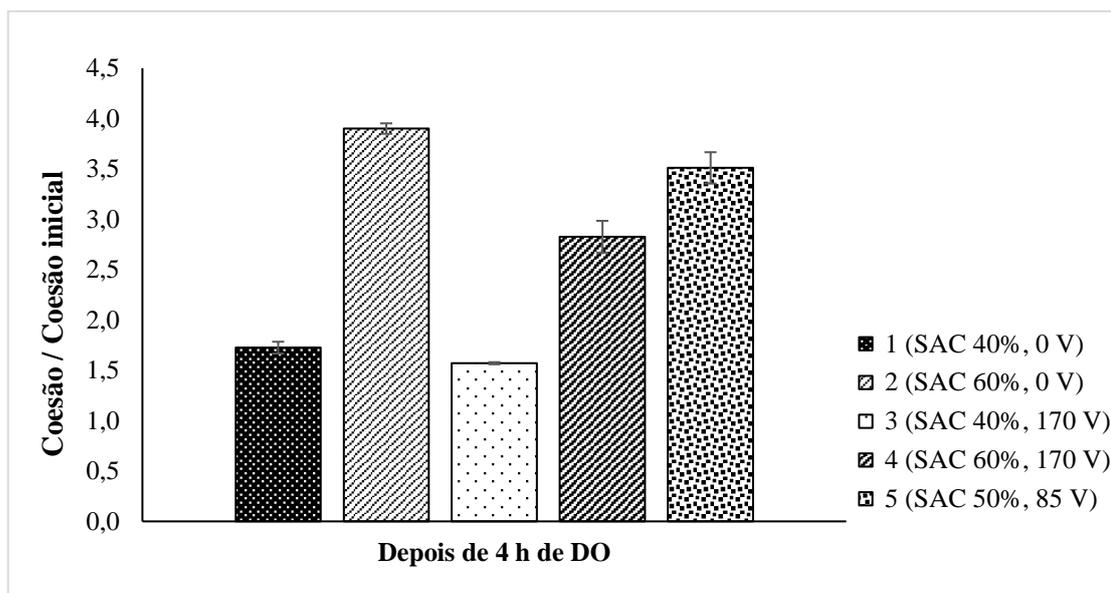


Figura 4.7 – Coesão normalizada após 4 horas de DO.

A análise estatística apresentada na Tabela 4.11, demonstrou que todos os fatores foram significativos para a coesão normalizada ao nível de confiança de 95%; é possível verificar que a concentração de sacarose exerce um efeito positivo sobre a coesão normalizada enquanto que a tensão elétrica e a interação entre os dois fatores exercem efeito negativo sobre a mesma. A concentração de sacarose apresentou o menor valor  $p$  e o maior valor  $t$ , mostrando ser a variável que mais influência na variação total a coesão normalizada. A coesão do tecido vegetal é determinada pela quantidade de substâncias pécnicas na lamela intermediária. A estrutura da membrana celular pode ser alterada durante o processo de desidratação osmótica, através da redistribuição das substâncias pécnicas, aumentando, assim, a coesão das amostras durante a desidratação osmótica (KHIN; ZHOU; YEO, 2006).

Tabela 4.11 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a coesão normalizada.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Puro	$t(5)$	$p$
Média*	2,706925	0,047082	57,49350	0,000000
Conc. sacarose*	1,715760	0,105279	16,29724	0,000016
Tensão elétrica*	-0,614584	0,105279	-5,83766	0,002087
Conc. sac. x tensão elétrica*	-0,459754	0,105279	-4,36700	0,007242

\*Significativo ( $p < 0,05$ )

A análise de variância (ANOVA), apresentada no Apêndice B, mostra que o coeficiente de determinação obtido para o modelo completo foi de 0,8037, sendo considerando bom por tratar-se de uma análise de textura que normalmente apresenta grande variabilidade. A Equação 4.3 representa o modelo com variáveis codificadas para a coesão normalizada, dentro dos limites da concentração de sacarose (%) da solução e da tensão elétrica (V) aplicada:

$$\text{Coesão nor.} = -2,42457 + 0,10878x_1 + 0,00991x_2 - 0,00027x_1x_2 \quad (4.3)$$

A Tabela 4.12 mostra os resultados experimentais e previstos pelo modelo para a coesão normalizada, além dos parâmetros estatísticos para avaliação do ajuste. Observa-se que à medida que aumenta o teor de sacarose da solução osmótica ocorre aumento da coesão normalizada; este fato pode ser explicado pela ordem de grandeza do coeficiente relacionado à concentração de sacarose em relação aos demais coeficientes da Equação 4.4. Isso também explica a maior influência da aplicação de MEF na solução mais concentrada.

Tabela 4.12 - Coesão normalizada experimental e prevista

Tratamento	Experimental	Previsto	$\chi^2$	RMSE	E (%)
1 (SAC 40%, 0 V)	1,73 ± 0,06	1,926	0,046	0,148	
2 (SAC 60%, 0 V)	3,90 ± 0,05	4,102	0,021	0,147	
3 (SAC 40%, 170 V)	1,57 ± 0,01	1,772	0,046	0,142	11,99
4 (SAC 60%, 170 V)	2,8 ± 0,2	3,028	0,043	0,181	
5 (SAC 50%, 85 V)	3,5 ± 0,2	2,707	0,495	0,579	

Avaliando os valores obtidos para os parâmetros de ajuste, pode-se concluir que o modelo analisado se mostra satisfatório para explicar os dados experimentais. Através da Figura 4.8 também é possível visualizar os valores experimentais e previstos através do planejamento experimental para a variação da coesão normalizada, onde os pontos representam os valores experimentais e a linha contínua os valores teóricos da coesão normalizada.

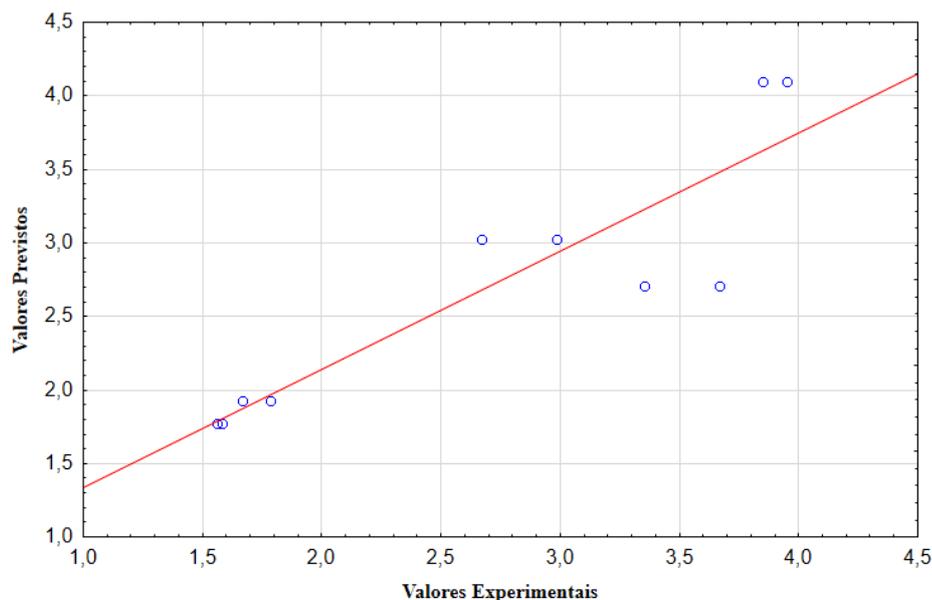


Figura 4.8 - Valores experimentais em função dos valores previstos para a coesão normalizada.

A Figura 4.9 apresenta as linhas de contorno para coesão normalizada em função da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada. A coesão normalizada é

influenciada principalmente pelo teor de sacarose da solução osmótica, e a aplicação de MEF apresenta maior influência sobre os experimentos realizados com soluções com maior concentração de sacarose.

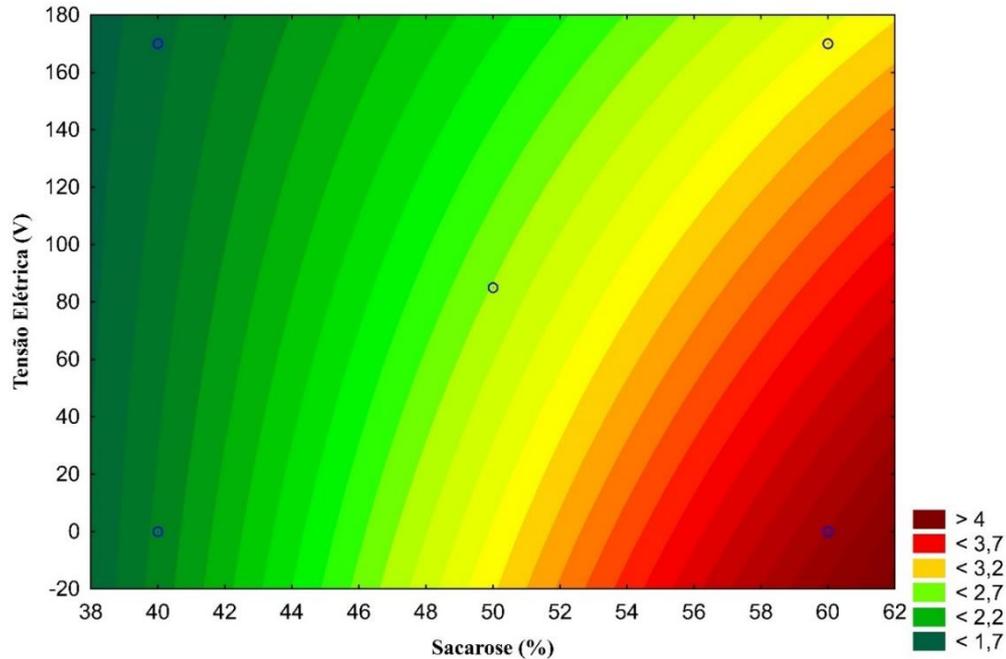


Figura 4.9 - Linhas de contorno para a coesão normalizada em função da tensão elétrica (V) aplicada e da concentração de sacarose (%).

A Figura 4.10 mostra os resultados obtidos para a elasticidade normalizados (elasticidade/elasticidade inicial) após 4 horas de DO para todos os tratamentos. Para os tratamentos com 40% de sacarose (tratamento 1 e 3), a elasticidade normalizada aumenta com a aplicação do MEF; por outro lado, analisando os resultados para os tratamentos com 60% de sacarose (tratamento 2 e 4), não é possível visualizar o mesmo comportamento.

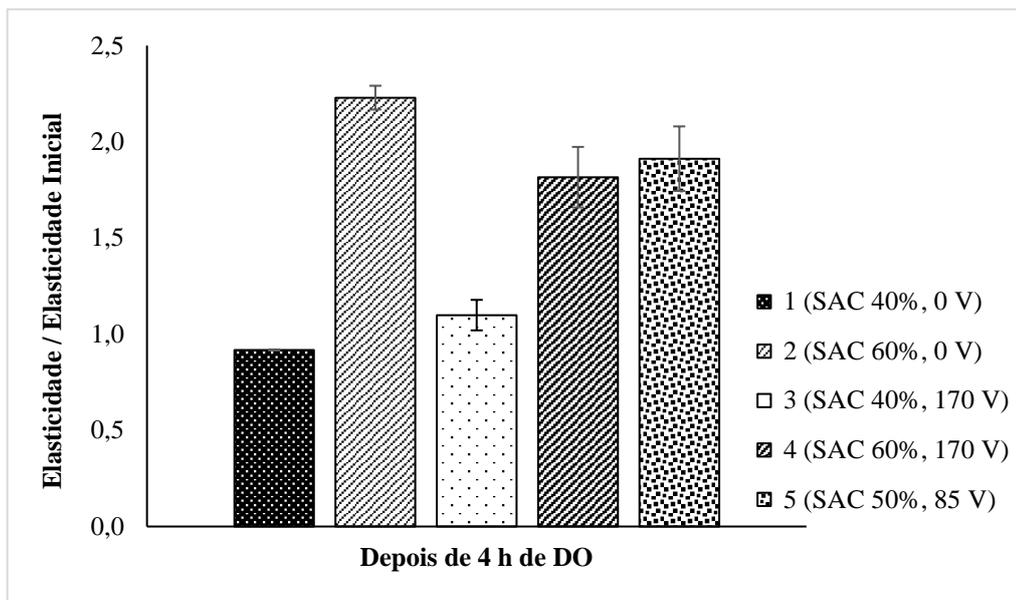


Figura 4.10 - Elasticidade normalizada após 4 horas de DO.

A Tabela 4.13 apresenta a análise estatística dos resultados de elasticidade. Observa-se que a concentração de sacarose e a interação entre a concentração de sacarose e a tensão elétrica foram significativos; a concentração de sacarose exerce um efeito positivo sobre a elasticidade normalizada e a interação exerce efeito negativo sobre a mesma. A concentração de sacarose é a variável que mais influência na elasticidade normalizada, pois, avaliando os resultados obtidos para os tratamentos com o mesmo teor de sacarose, pode-se perceber que praticamente não ocorre variação da elasticidade com a aplicação de MEF.

Tabela 4.13 - Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a elasticidade normalizada.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Puro	$t(5)$	$p$
Média*	1,594887	0,050215	31,76099	0,000001
Conc. sacarose*	1,014426	0,112285	9,03441	0,000278
Tensão elétrica	-0,116090	0,112285	-1,03389	0,348581
Conc. sac. x tensão elétrica*	-0,297365	0,112285	-2,64831	0,045519

\*Significativo ( $p < 0,05$ )

Através da análise de variância (ANOVA) apresentada no Apêndice B pode-se concluir o modelo reduzido representa adequadamente a elasticidade normalizada, pois o coeficiente de determinação obtido para o modelo completo foi de 0,8467. O valor obtido para o  $R^2$  é considerando bom por tratar-se de uma análise de textura que normalmente apresenta grande variabilidade nos resultados. A Equação 4.4 representa o modelo com variáveis codificadas para a elasticidade normalizada, dentro dos limites da concentração de sacarose (%) da solução e da tensão elétrica (V) aplicada.

$$\text{Elasticidade nor.} = -0,941179 + 0,052409x_1 - 0,00002x_1x_2 \quad (4.4)$$

A Tabela 4.14 mostra os resultados experimentais e previstos pelo modelo para a elasticidade normalizada, além dos parâmetros estatísticos para o ajuste do modelo.

Tabela 4.14 - Elasticidade normalizada experimental e predita.

Tratamento	Experimental	Previsto	$\chi^2$	RMSE	E (%)
1 (SAC 40%, 0 V)	0,918 ± 0,001	1,155	0,098	0,168	
2 (SAC 60%, 0 V)	2,23 ± 0,06	2,203	0,004	0,048	
3 (SAC 40%, 170 V)	1,10 ± 0,08	1,020	0,025	0,079	12,46
4 (SAC 60%, 170 V)	1,8 ± 0,2	2,001	0,059	0,172	
5 (SAC 50%, 85 V)	1,9 ± 0,2	1,595	0,162	0,254	

O modelo analisado mostra-se satisfatório para explicar os dados experimentais de acordo com a avaliação dos parâmetros de ajuste. Os valores experimentais e previstos através do planejamento experimental para a elasticidade normalizada também podem ser visualizados através da Figura 4.11.

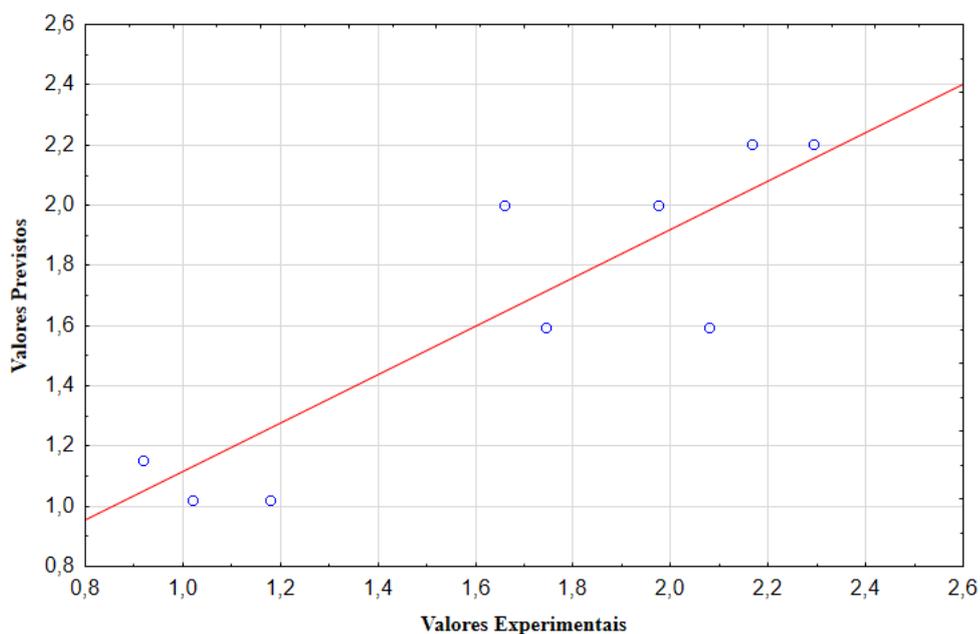


Figura 4.11 - Valores experimentais em função dos valores previstos para a elasticidade normalizada.

A Figura 4.12 apresenta as linhas de contorno para a elasticidade normalizada em função da concentração de sacarose (%) e da tensão elétrica (V) aplicada. A elasticidade normalizada foi influenciada principalmente pela concentração de sacarose (%) e, com menor intensidade pela aplicação de MEF.

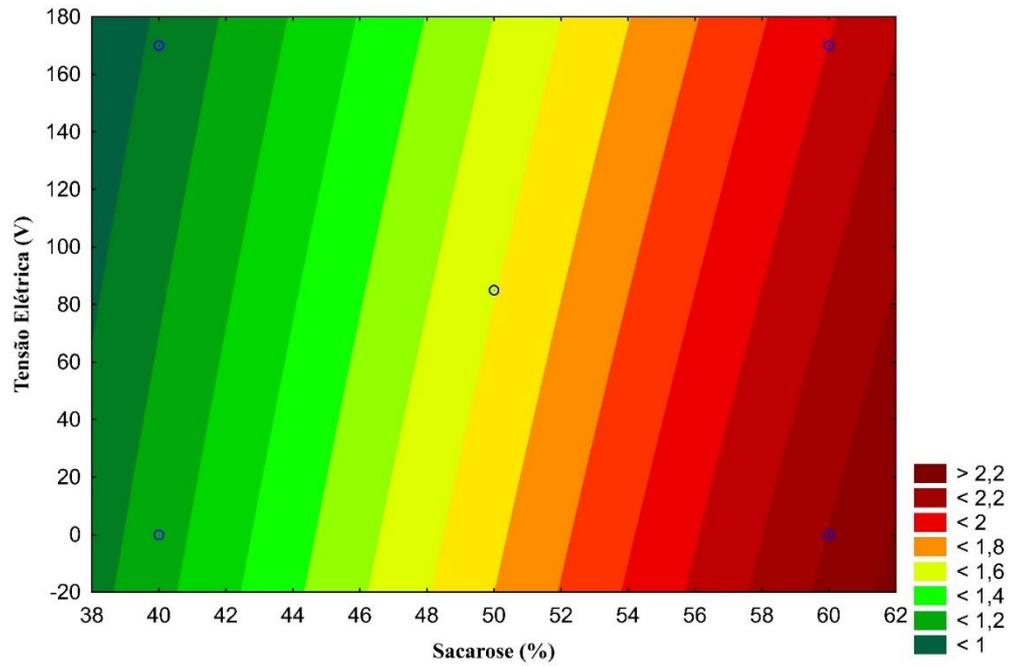


Figura 4.12 - Linhas de contorno para a elasticidade normalizada em função da tensão elétrica (V) aplicada e da concentração de sacarose (%).

---

## Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo estudar o processo de transferência de massa durante a desidratação osmótica assistida por campo elétrico moderado (MEF) de maçã tipo gala.

Os resultados mostraram que, de forma geral, o MEF promoveu um aumento da perda de água e da taxa inicial de transferência de água do produto para a solução osmótica, indicando que o processo de desidratação é facilitado pela aplicação de MEF. Por exemplo, para desidratar uma amostra com teor de umidade inicial ( $x^v$ ) de 6,8 g água/g sólidos até um valor final de 1,0 g água/g sólidos, utilizando uma solução de sacarose com concentração de 60%, necessita-se de um tempo de processamento de 4,7 horas sem aplicação de MEF e de 2,4 horas com aplicação de 170 V de MEF. A incorporação de sólidos e a taxa inicial de sacarose também aumentaram com a aplicação de MEF, porém de forma menos significativa. Também é possível concluir que a aplicação de MEF permitiu que a condição de equilíbrio fosse alcançada mais rapidamente.

A solução analítica da Segunda Lei da Difusão de Fick mostrou-se adequada para a determinação da difusividade mássica efetiva da água e da sacarose na maçã gala. A difusividade mássica efetiva da água variou de  $5,38 - 7,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e foi influenciada pela concentração de sacarose e pela tensão elétrica. A difusividade mássica efetiva da sacarose variou de  $2,0 - 3,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e foi influenciada apenas pela tensão elétrica (V). Com a aplicação de 170 V de tensão, para uma solução de sacarose com concentração de 60%, obtém-se um aumento de 17 e 33% na difusividade mássica efetiva da água e da sacarose, respectivamente, quando comparado com o processo sem aplicação de MEF. Portanto, a desidratação osmótica assistida por MEF resulta na aceleração da transferência de massa, reduzindo, assim, o tempo de processamento. O aumento das taxas de transferência de massa

pode ser explicado pelos efeitos não térmicos da eletroporação e permeabilização que modificam a estrutura celular do alimento, facilitando a difusão tanto da água quanto dos sólidos através do tecido vegetal. Esse fenômeno visualizado nas micrografias do tecido da maçã, que apresentou expansão e deformação do espaço intracelular, com alteração e rompimento da parede celular.

A variação total de cor ( $\Delta E^*$ ) foi influenciada pela concentração de sacarose e pela tensão elétrica, sendo este último de maneira mais significativa. A aplicação de MEF causou escurecimento das amostras, sendo uma alternativa para contornar este problema o uso de antioxidantes na solução osmótica. Esse procedimento também reduziria a degradação dos compostos fenólicos presentes na maçã que aumentou com a aplicação do MEF.

De maneira geral, pode-se concluir que o MEF influenciou em todos os parâmetros de textura avaliados, com exceção da fragilidade. A dureza diminuiu com a aplicação de MEF, pois as amostras tiveram sua umidade reduzida e, conseqüentemente, maior deformação. A coesão e a elasticidade também diminuíram com o aumento da tensão elétrica.

---

## Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir da presente pesquisa, é possível indicar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- analisar os efeitos de tensões elétricas mais elevadas sobre as variáveis de resposta, já que os resultados obtidos mostraram-se positivos em relação à difusividade mássica efetiva, perda de água e incorporação de sólidos;
- pesquisar alternativas para contornar o problema da alteração de cor, pois a aplicação de MEF escureceu a amostra durante o processo de desidratação osmótica;
- realizar análise sensorial das maçãs ao final dos tratamentos a fim de avaliar o efeito da incorporação da sacarose e do MEF sobre o sabor e a aceitabilidade do produto final;
- desenvolver produtos que apliquem a maçã desidratada osmoticamente em sua formulação, para viabilizar sua utilização do produto na indústria alimentícia.

---

## Referências Bibliográficas

ABBOTT, J. A. Quality measurement of fruits and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, [s. l.], v. 15, p. 207–225, 1999.

ABPM. **Mensagem ABPM 229/2010 - Imprensa Nacional e Internacional**. 2016. Disponível em: <<http://www.abpm.org.br/portugues/mensagens/imprensa/2292010/maca.htm>>. Acesso em: 26 out. 2016.

AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 34, p. 29–43, 2016.

ALLALI, H.; MARCHAL, L.; VOROBIEV, E. Effect of Blanching by Ohmic Heating on the Osmotic Dehydration Behavior of Apple Cubes. **Drying Technology**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 739–746, 2009.

AOAC. AOAC Official Methods of Analysis. **Association of Official Agricultural Chemists. Washington, D.C.**, [s. l.], v. 15th, n. Volume 1, p. 136–138, 1990.

ASSIS, Fernanda R.; MORAIS, Rui M. S. C.; MORAIS, Alcina M. M. B. Mathematical Modelling of Osmotic Dehydration Kinetics of Apple Cubes. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], 2016.

AWAD, M. A.; DE JAGER, A.; VAN WESTING, L. M. Flavonoid and chlorogenic acid levels in apple fruit: characterisation of variation. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 83, p. 249–263, 1999.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; TAPIA, M. S.; CANO, M. P. **Novel food processing technologies**. [s.l.] : CRC Press, 2005.

BERNARDI, J.; DENARDI, F.; HOFFMANN, A. **Frutas do Brasil, 37: Maçã Produção - CULTIVARES E PORTA-ENXERTOS**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/5CultivaresPortaEnxertosProducao\\_000fi6cxttd302wyiv80mr28rzqi9bvh5.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/5CultivaresPortaEnxertosProducao_000fi6cxttd302wyiv80mr28rzqi9bvh5.pdf)>. Acesso em: 30 set. 2018.

BOURNE, M. C. Texture Profile of Ripening Pears. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 223–226, 1968.

---

BOURNE, M. C.; COMSTOCK, S. H. Effect of Degree of Compression on Texture Profile Parameters. **Journal of Texture Studies**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 201–216, 1981.

BOYER, J.; LIU, R. H. Apple phytochemicals and their health benefits. **Nutrition Journal**, [s. l.], v. 3, 2004.

BROCHIER, Bethania. **Estudo da desidratção osmótica de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) usando solutos alternativos à sacarose**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2013, 101 p.

CÓRDOVA, K. R. V. **Desidratação Osmótica e Secagem Convectiva de Maça Fuji Comercial e Industrial**. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006, 148 p.

COSTER, H. G. L. A Quantitative Analysis of the Voltage-Current Relationships of Fixed Charge Membranes and the Associated Property of “Punch-Through”. **Biophysical Journal**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 669–686, 1965.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. [s. l.], p. 414, 1975.

DEY, P. M.; HARBORNE, J. B.; BONNER, J. **Plant biochemistry**. [s.l.] : Academic Press, 1997.

DUARTE, G. G. **Parametrização do Processo de Secagem de Fruta, Pera e Maça**. Dissertação de Mestrado - Mestrado em Biotecnologia Alimentar, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012, 103 p.

EL-AOUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M.; MURR, F. E. X. Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya ( *Carica papaya* L. ). **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 59, p. 85–91, 2003.

FELICIANO, E. **Clube da Maça de Alcobaça**. [s.d.]. Disponível em: <<http://clubedamaca.pt/Page/13518/articleType/ArticleView/articleId/1046/Galeria-documentos.aspx>>. Acesso em: 18 out. 2018.

FREIRE, C. J. S. et al. **Coleção Plantar: Maça**. Brasília.

FRIEDMAN, H. H.; WHITNEY, J. E.; SZCZESNIAK, A. S. The Texturometer: A New Instrument for Objective Texture Measurement. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 390–396, 1963.

GARCÍA-MARTÍNEZ, E. et al. Characterisation of reused osmotic solution as ingredient in new product formulation. **Food Research International**, [s. l.], v. 35, n. 2–3, p. 307–313, 2002.

GIL, M. I. et al. Antioxidant Capacities, Phenolic Compounds, Carotenoids, and Vitamin C Contents of Nectarine, Peach, and Plum Cultivars from California. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], 2002.

GOULLIEUX, A.; PAIN, J. P. Chapter 22: Ohmic Heating. In: SUN, D. W. (Ed.). **Emerging Technologies for Food Processing**. 2. ed. [s.l: s.n.]. p. 399–422.

HOLDERBAUM, D. F.; KON, T.; GUERRA, M. P. Dynamics of total phenolic content in different apple tissues and genotypes: impacts and relevance for breeding programs. **Scientia**

---

**Horticulturae**, [s. l.], v. 168, p. 58–63, 2014.

JEMAI, A. B.; VOROBIEV, E. Effect of moderate electric field pulses on the diffusion coefficient of soluble substances from apple slices. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 37, p. 73–86, 2002.

KHAN, M. R. Osmotic dehydration technique for fruits preservation-A review. **Pakistan Journal of Food Sciences**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 71–85, 2012.

KHIN, M. M.; ZHOU, W.; YEO, S. Y. Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes using maltodextrin as the coating material and their textural properties. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 81, n. 3, p. 514–522, 2006.

KHIN, Mya Mya; ZHOU, Weibiao; PERERA, Conrad O. A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 84–95, 2006.

KIST, B. B. **Anuário Brasileiro da maçã 2018** Editora Gazeta Santa Cruz. Santa Cruz do Sul.

KULSHRESTHA, S. A.; SASTRY, S. K. Changes in permeability of moderate electric field (MEF) treated vegetable tissue over time. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 11, p. 78–83, 2009.

KULSHRESTHA, S.; SASTRY, S. Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 189–194, 2003.

KUSNADI, C.; SASTRY, S. K. Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 329–336, 2012.

KUTZ, M. **Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering**. Second ed. New York: Academic Press, 2013.

LEBOVKA, N. I.; SHYNKARYK, M. V.; VOROBIEV, E. Drying of Potato Tissue Pretreated by Ohmic Heating. **Drying Technology**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 601–608, 2006.

LENART, A. Osmo-Convective Drying of Fruits and Vegetables: Technology and Application. **Drying Technology**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 391–413, 1996.

LERICI, C. R. et al. Osmotic Dehydration of Fruit: Influence of Osmotic Agents on Drying Behavior and Product Quality. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 50, n. 5, p. 1217–1219, 1985.

LIU, Y. et al. Comparison of the HPLC method and FT-NIR analysis for quantification of glucose, fructose, and sucrose in intact apple fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 54, n. 8, p. 2810–2815, 2006.

MARTINS, C. R. et al. Atividade polifenoxidase e compostos fenólicos em pós-colheita de pêssegos cultivado em pomar com cobertura vegetal e cultivo tradicional. **Ciência Rural**, [s. l.], p. 749–754, 2004.

MEIJERINK, M. R. **Irreversible Electroporation**. 2015. Disponível em: <[http://angiodynamics.com/upload/6-NanoKnife\\_Meijerink\\_MLC\\_684\\_A4.pdf](http://angiodynamics.com/upload/6-NanoKnife_Meijerink_MLC_684_A4.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

MERCALI, G. D. et al. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 82–91, 2011.

MINOLTA, Konica. **Comunicação precisa da cor: controle de qualidade da percepção à instrumentação**. Japão: Minolta Corporation, 1998.

MORENO, J. et al. Effect of pulsed-vacuum and ohmic heating on the osmodehydration kinetics, physical properties and microstructure of apples (cv. Granny Smith). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 562–568, 2011. a.

MORENO, J. et al. Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packham's Triumph). **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 104, n. 4, p. 621–627, 2011. b.

NACHTIGALL, G. R. **MAÇÃ: Produção**. Brasília. Disponível em: <[http://livraria.sct.embrapa.br/liv\\_resumos/pdf/00075330.pdf](http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00075330.pdf)>.

NACZK, M.; SHAHIDI, F. Extraction and analysis of phenolics in food. **Journal of Chromatography A**, [s. l.], v. 1054, n. 1–2, p. 95–111, 2004.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos - Sebo Livrologia | Estante Virtual**. São Paulo.

PELEG, A. An Empirical Model for the Description Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 1216–1217, 1988.

PENG, Y. et al. Determination of polyphenols in apple juice and cider by capillary electrophoresis with electrochemical detection. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 169–175, 2005.

PHISUT, N. MiniReview Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. **International Food Research Journal**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 7–18, 2012.

PRADO, A. Composição fenólica e atividade antioxidante de frutas tropicais. **Dissertação**, [s. l.], p. 105, 2009.

RAOULT-WACK, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 5, n. 8, p. 255–260, 1994.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. .. ..; NIRANJAN, K. Chapter 11: Recent Developments in Osmotic Dehydration. In: SUN, DA-WEN (Ed.). **Emerging Technologies for Food Processing**. SECOND ed. Dublin, Ireland: Elsevier, 2014. p. 653.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 37, p. 43–47, 2004.

ROSENTHAL, A. J. **Food texture : measurement and perception**. [s.l.] : Aspen Publishers, 1999.

SANTOS, P. S. **Aplicação da Espectroscopia de Infravermelho Próximo na Avaliação de Alguns Atributos de Qualidade dm Pêra 'Rocha' e Maçã 'Gala'**. Dissertação de Mestrado - Mestrado em Engenharia Agrônômica – Hortofruticultura e Viticultura, Universidade

Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009, 80 p.

SASTRY, S. K. Ohmic Heating and Moderate Electric Field Processing. **Food Science and Technology International**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 419–422, 2008.

SEBRAE NACIONAL. **O cultivo e o mercado da maçã** | Sebrae. 2018. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-da-maca,ea7a9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 30 set. 2018.

SENSOY, I.; SASTRY, S. K. Extraction Using Moderate Electric Fields. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 69, n. 1, p. FEP7-FEP13, 2004.

SHAHIDI, F.; NACZK, M. **Food phenolics : sources, chemistry, effects, applications**. Lancaster Pa.: Technomic Pub. Co, 1995.

SIMPSON, R. et al. Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 166, p. 204–211, 2015.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, [s. l.], v. 16, n. 3, 1965.

SMITH, P. G. Chapter 15: Mass Transfer Operations. In: **Introduction to Food Process Engineering**. New York: Springer US, 2011. p. 510.

SOMAVAT, R.; MOHAMED, H. M. H.; SASTRY, S. K. Inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores under ohmic and conventional heating. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 194–198, 2013.

TACO. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos 2011.

TOBERGTE, D. R.; CURTIS, S. **Maça: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/964485>>

TOGNON, A. L. **Quantificação e avaliação da bioacessibilidade in vitro de micro e macroelementos em frutas, hortaliças e cereais**. Dissertação de Mestrado - Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012, 111 p.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 59–68, 1993.

TORTOE, C. A review of osmodehydration for food industry. **African Journal of Food Science**, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 303–324, 2010.

TSAO, R. et al. Which Polyphenolic Compounds Contribute to the Total Antioxidant Activities of Apple? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 53, p. 4989–4995, 2005.

VAN DER SLUIS, A. A. et al. Activity and Concentration of Polyphenolic Antioxidants in Apple Juice. 1. Effect of Existing Production Methods. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], 2002.

VANZANI, P. et al. Major Phytochemicals in Apple Cultivars: Contribution to Peroxyl Radical

Trapping Efficiency. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], 2005.

VARZAKAS, T. H. et al. Theoretical and experimental approaches towards the determination of solute effective diffusivities in foods. **Enzyme and Microbial Technology**, [s. l.], v. 37, p. 29–41, 2005.

VEGA-GÁLVEZ, A. et al. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics , antioxidant capacity , total phenolic content , colour , texture and microstructure of apple ( var . Granny Smith ) slices. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 132, p. 51–59, 2012.

VICENTE, A. et al. Chapter 7: Electricity Effects on Microorganisms and Enzymes. In: **Ohmic Heating for Food Processing**. [s.l.] : CRC Press, 2012. p. 459–500.

VOROBIEV, E.; LBOVKA, N.; CHEMAT, F. **Enhancing Extraction Processes in the Food Industry**. [s.l: s.n.].

VOROBIEV, E.; LBOVKA, N. I. **Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials**. [s.l.] : Springer, 2008.

WON, K. W. et al. Major Phenolics in Apple and Their Contribution to the Total Antioxidant Capacity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], 2003.

YETENAYET, B. T.; HOSAHALLI, S. R. Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings. **Ethiopian Journal of Applied Sciences and Technology**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 1–15, 2010.

ZHONG, Tuoxiu; LIMA, Marybeth. The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 87, n. 6, p. 215–220, 2003.

---

## Apêndice A

### Dados complementares – Teor de Sacarose

A seguir, são apresentados os resultados experimentais de teor de sólidos solúveis e de sacarose das amostras tratadas osmoticamente nos diferentes tempos de imersão. Para a determinação do teor de sacarose através de sólidos solúveis (Tabela A.1) as análises foram realizadas em duplicata e para HPLC (Tabela A.2) em triplicata.

Tabela A.1 - Teor de sólidos solúveis (°Brix) determinado por refratômetro

Tempo de DO (min)	Trat. 1 (SAC 40%, 0V)	Trat. 2 (SAC 60%, 0V)	Trat. 3 (SAC 40%, 170V)	Trat. 4 (SAC 60%, 170V)	Trat. 5 (SAC 50%, 85V)
0	11,1 ± 0,2	10,1 ± 0,2	10,6 ± 0,1	10,48 ± 0,08	9,65 ± 0
20	23,1 ± 1,1	25,3 ± 1,3	22,3 ± 0,3	29,6 ± 0,9	23,5 ± 1,5
40	24,78 ± 0,08	30,3 ± 0,5	25,7 ± 0,5	32,9 ± 0,8	25,9 ± 1,8
80	27,23 ± 0,02	37,03 ± 0,07	27,9 ± 0,4	38,8 ± 1,2	31,9 ± 0,9
120	28,6 ± 0,1	41,9 ± 0,9	30,48 ± 0,02	45,4 ± 0,5	34,1 ± 0,8
180	29,2 ± 0,1	44,3 ± 0,2	30,7 ± 0,9	48,1 ± 0,5	40,2 ± 0,5
240	31,3 ± 0,7	47,3 ± 0,2	32,9 ± 0,5	48,6 ± 0,1	41,5 ± 0,9

Tabela A.2 - Teor de sacarose (g de sacarose por 100 g de amostra) determinado pela análise de HPLC

Tempo de DO (min)	Trat. 1 (SAC 40%, 0V)	Trat. 2 (SAC 60%, 0V)	Trat. 3 (SAC 40%, 170V)	Trat. 4 (SAC 60%, 170V)	Trat. 5 (SAC 50%, 85V)
0	10,0 ± 0,2	9,52 ± 0,06	10,1 ± 0,4	9,1 ± 0,2	10,68 ± 0,02
20	17,2 ± 0,3	21,6 ± 0,5	20,1 ± 0,2	23,3 ± 0,4	19,5 ± 0,6
40	19,0 ± 0,2	25,8 ± 1,2	21,9 ± 0,3	27,5 ± 0,3	22,9 ± 1,9
80	23,5 ± 0,4	30,4 ± 0,1	26,3 ± 1,0	37,4 ± 0,7	27,7 ± 1,5
120	24,5 ± 0,4	37,2 ± 0,5	27,9 ± 0,2	38,07 ± 0,09	30,6 ± 1,9
180	26,6 ± 0,1	40,1 ± 0,1	30,3 ± 0,6	40,8 ± 0,7	34,5 ± 1,2
240	27,9 ± 0,4	44,5 ± 0,2	31,1 ± 1,1	44,5 ± 0,1	36,6 ± 2,2

---

## Apêndice B

### Dados complementares – ANOVA

A seguir, são apresentados os resultados da análise de variância (ANOVA) para avaliar a significância da regressão e a falta de ajuste do modelo para o teor de umidade no equilíbrio, teor de sacarose no equilíbrio, variação total de cor, textura e compostos fenólicos.

Tabela B.1 - Análise de variância da significância da regressão e da falta de ajuste do modelo completo para previsão do teor de umidade no equilíbrio.

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F calculado	F tabelado
Regressão	1,78	3	0,59	127,5754	4,7571
Resíduo	0,03	6	0,00		
Falta de ajuste	0,026396	1	0,03	85,2375	
Erro puro	0,001548	5	0,00		
Total	1,810438	9			$R^2 = 0,9846$

Tabela B.2 - Análise de variância da significância da regressão e da falta de ajuste do modelo completo para previsão do teor de sacarose no equilíbrio.

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F calculado	F tabelado
Regressão	717,75	3	239,25	91,5693	4,7571
Resíduo	15,68	6	2,61		
Falta de ajuste	1,597359	1	1,60	0,5673	
Erro puro	14,079351	5	2,82		
Total	733,429436	9			$R^2 = 0,97863$

Tabela B.3 - Análise de variância da significância da regressão e da falta de ajuste do modelo reduzido para previsão do teor de sacarose no equilíbrio.

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F calculado	F tabelado
Regressão	717,74	2	358,87	160,1078	4,7374
Resíduo	15,69	7	2,24		
Falta de ajuste	1,610630	2	0,81	0,2860	
Erro puro	14,079351	5	2,82		
<b>Total</b>	<b>733,429436</b>	<b>9</b>			<b><math>R^2 = 0,97861</math></b>

Tabela B.4 - Análise de variância da significância da regressão e da falta de ajuste do modelo completo para previsão da coesão normalizada

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F calculado	F tabelado
Regressão	7,07	3	2,36	8,1884	4,7571
Resíduo	1,73	6	0,29		
Falta de ajuste	1,614978	1	1,61	72,8537	
Erro puro	0,110837	5	0,02		
<b>Total</b>	<b>8,791654</b>	<b>9</b>			<b><math>R^2 = 0,8037</math></b>

Tabela B.5 - Análise de variância da significância da regressão e da falta de ajuste do modelo completo para previsão da elasticidade normalizada

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F calculado	F tabelado
Regressão	2,26	3	0,75	11,9753	4,7571
Resíduo	0,38	6	0,06		
Falta de ajuste	0,251686	1	0,25	9,9813	
Erro puro	0,126079	5	0,03		
<b>Total</b>	<b>2,639690</b>	<b>9</b>			<b><math>R^2 = 0,8569</math></b>

Tabela B.6 - Análise de variância da significância da regressão e da falta de ajuste do modelo reduzido para previsão da elasticidade normalizada

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F calculado	F tabelado
Regressão	2,23	2	1,12	19,3280	4,7374
Resíduo	0,40	7	0,06		
Falta de ajuste	0,278639	2	0,14	5,5251	
Erro puro	0,126079	5	0,03		
<b>Total</b>	<b>2,639690</b>	<b>9</b>			<b><math>R^2 = 0,8467</math></b>