



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto

MARIA JULIA NEVES MARTINS

**EMPREGO DE ULTRASSOM DE ALTA INTENSIDADE PARA
INTENSIFICAÇÃO DA ETAPA DE DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA PARA
PRODUÇÃO DE GENGIBRE SEMI-DESIDRATADO**

São José do Rio Preto - SP
2023

MARIA JULIA NEVES MARTINS

**EMPREGO DE ULTRASSOM DE ALTA INTENSIDADE PARA
INTENSIFICAÇÃO DA ETAPA DE DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA PARA
PRODUÇÃO DE GENGIBRE SEMI-DESIDRATADO**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Carregari Polachini

São José do Rio Preto - SP
2023

M386e	Martins, Maria Julia Neves Emprego de ultrassom de alta intensidade para intensificação da etapa de desidratação osmótica para produção de gengibre semi-desidratado / Maria Julia Neves Martins. -- São José do Rio Preto, 2023 163 f. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto Orientador: Javier Telis Romero Coorientador: Tiago Carregari Polachini 1. Sacarose. 2. Glicose. 3. Frutose. 4. Maltitol. 5. Cavitação. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARIA JULIA NEVES MARTINS

**EMPREGO DE ULTRASSOM DE ALTA INTENSIDADE PARA
INTENSIFICAÇÃO DA ETAPA DE DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA PARA
PRODUÇÃO DE GENGIBRE SEMI-DESIDRATADO**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Javier Telis Romero
UNESP – Câmpus de São José do
Rio Preto
Orientador

Prof^a. Dr^a. Kivia Mislaine Albano
UFSCar - Universidade Federal de
São Carlos

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes
Corrêa
UFLA - Universidade Federal de
Lavras

Dr^a. Jessica Thaís do Prado Silva
USP - Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Róger Darros Barbosa
UNESP – Câmpus de São José do
Rio Preto

São José do Rio Preto - SP
17 de fevereiro de 2023

Dedico este trabalho...

... à minha família, que sempre me apoiou nesta escolha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter iluminado minha trajetória até aqui.

Agradeço à minha família em especial meus pais Arthur e Davilza, meu irmão Arthur Henrique e meus avôs Arthur e David por sempre me apoiarem nas minhas escolhas. Amo vocês.

Agradeço à minhas avós Ilza (*in memorian*) e Pierina (*in memorian*), embora não presentes, por seus ensinamentos e recordações que foram essenciais para superar os dias turbulentos.

Agradeço à minha família pelo carinho.

Agradeço ao meu orientador Javier e coorientador Tiago pela amizade, apoio, paciência, por sempre ter me auxiliado e compartilhado seus conhecimentos.

Agradeço aos meus amigos de laboratório Marcio Augusto, Bianca, Carol, André, Rodrigo, Adilson e Micael pela amizade, companheirismo e pelos momentos de alegria. Vocês são especiais.

Agradeço à todos os professores do departamento, por compartilhar seus conhecimentos e experiências.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, a qual agradeço pelo apoio financeiro.

RESUMO

O gengibre é um alimento que vem sendo bastante consumido em várias formulações devido ao seu sabor característico de pungência e pelas propriedades nutraceuticas. Entretanto, sua alta perecibilidade *in natura* devido à alta umidade é um dos problemas enfrentados pelas indústrias. Por isso, tecnologias combinadas vêm sendo estudadas para melhoria do processo e qualidade do produto final. A desidratação osmótica, aplicada como pré-tratamento à secagem para a redução parcial de umidade, pode ser combinada com aplicação de ultrassom para a intensificação dos processos de transferência de massa. Nestes processos, a sacarose é usada como agente osmótico tradicional, embora venha sendo substituída por glicose, frutose e solutos não convencionais, como o maltitol. Este último permite atender às demandas do consumidor por produtos com teor calórico reduzido. A determinação das propriedades termofísicas das soluções osmóticas em ampla faixa de concentração e temperatura é a etapa inicial necessária para o correto dimensionamento da transferência de massa, assim como outras operações unitárias e dimensionamento de equipamentos. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a intensificação da etapa de desidratação osmótica de gengibre através do emprego de ultrassom de alta intensidade, visando sua transformação em produto final semi-desidratado. Para isso, inicialmente, soluções osmóticas de sacarose, glicose e frutose foram caracterizadas de acordo com as propriedades termofísicas (densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica) em ampla faixa de concentração (10 a 60°Brix) e temperatura (273,15 a 358,15K). Propriedades de transporte de soluções saturadas convencionais de sacarose e não-convencionais de maltitol também foram estudadas em condições similares de temperatura (273,15 a 358,15K). Foi realizado, então, um estudo comparativo da desidratação osmótica de gengibre em solução saturada de maltitol na condição convencional, agitada mecanicamente (100 rpm) ou assistida por ultrassom de alta intensidade (700W) com sistema pulsado (1 s on; 4 s off) em diferentes temperaturas (25, 35 e 45°C). Como resultados, maiores densidades e menores valores de calor específico e condutividade térmica foram observados para as soluções osmóticas de sacarose, glicose e frutose quando a temperatura diminuiu e a concentração de soluto aumentou. Ao avaliar as soluções saturadas de sacarose e maltitol, a densidade e a difusividade térmica apresentaram valores crescentes com o

aumento da temperatura, enquanto o calor específico e a condutividade térmica apresentaram valores decrescentes nas mesmas condições. A viscosidade apresentou comportamento contrário para as soluções com o aumento da temperatura: aumentando para maltitol e diminuindo para sacarose. Tais resultados foram relacionados com as mudanças simultâneas na solubilidade e concentração dos solutos em solução. Por fim, a desidratação osmótica de gengibre em temperaturas mais altas foi intensificada no que diz respeito à perda de água e ganho de sólidos, independente do processo aplicado. Entre as três condições de desidratação osmótica, a condição assistida por ultrassom apresentou maior intensificação de perda de água e ganho de sólidos seguido pela condição agitada mecanicamente e a convencional. O modelo de Weibull apresentou melhores ajustes aos dados experimentais nas três condições de processamento com $R^2 \geq 0,9948$ e $RMSE \leq 0,1158$. Portanto, o ultrassom se mostrou como ferramenta eficiente para intensificar a transferência de massa na desidratação osmótica de gengibre com solução saturada de maltitol.

Palavras-chave: Sacarose. Glicose. Frutose. Maltitol. Técnicas combinadas. Cavitação.

ABSTRACT

Ginger is a food that has been widely consumed in various formulations due to its characteristic pungent flavor and nutraceutical properties. However, its high perishability in natura due to high moisture is one of the problems faced by industries. Therefore, combined technologies have been studied to improve the process and the quality of the final product. Osmotic dehydration applied as a pre-treatment to drying for partial moisture reduction, can be combined with ultrasound application for the intensification of mass transfer processes. In these processes, sucrose is used as the traditional osmotic agent, although it is being replaced by glucose, fructose, and unconventional solutes such as maltitol. The latter makes it possible to meet consumer demands for low-calorie products. Determining the thermophysical properties of osmotic solutions over a wide concentration and temperature range is a necessary initial step to correctly dimension mass transfer, as well as other unit operations and equipment dimensioning. Thus, the objective of this study was to evaluate the intensification of the ginger osmotic dehydration step through the use of high-intensity ultrasound, aiming its transformation into a semi-dehydrated final product. For this, initially, osmotic solutions of sucrose, glucose, and fructose were characterized according to thermophysical properties (density, viscosity, specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusivity) over a wide concentration (10 a 60°Brix) and temperature range (273,15 a 358,15K). Transport properties of conventional saturated sucrose and unconventional maltitol solutions were also studied under similar temperature conditions (273,15 a 358,15K). A comparative study of the osmotic dehydration of ginger in saturated maltitol solution in the conventional condition without stirring, mechanically stirred (100 rpm) or assisted by high-intensity ultrasound (700W) with pulsed system (1 s on; 4 s off) at different temperatures (25, 35 and 45°C) was then performed. As results, higher densities and lower values of specific heat and thermal conductivity were observed for the osmotic solutions of sucrose, glucose and fructose when the temperature decreased and the solute concentration increased. When evaluating the saturated sucrose and maltitol solutions, the density and thermal diffusivity showed increasing values with increasing temperature, while the specific heat and thermal conductivity showed decreasing values under the same conditions. The viscosity showed opposite behavior for the solutions with increasing temperature: increasing for maltitol and decreasing for sucrose. Such results were related to the

simultaneous changes in solubility and concentration of the solutes in solution. Finally, osmotic dehydration of ginger at higher temperatures was intensified with respect to water loss and solids gain, regardless of the process applied. Among the three osmotic dehydration conditions, the ultrasound-assisted condition showed the greatest intensification of water loss and solids gain followed by the mechanically agitated and the conventional without agitation condition. The Weibull model showed the better fits to the experimental data in the three processing conditions with $R^2 \geq 0.9948$ and $RMSE \leq 0.1158$. Therefore, ultrasound was shown to be an efficient tool to enhance mass transfer in osmotic dehydration of ginger with saturated maltitol solution.

Keywords: Sucrose. Glucose. Fructose. Maltitol. Combined techniques. Cavitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Organização dos capítulos apresentados na presente tese de doutorado.....	22
Figura 5.1. Apparatus used for measuring effective thermal conductivity.....	80
Figura 5.2. Density (ρ), specific heat (c_p) and thermal conductivity (λ) for (a, d, g) sucrose, (b, e, h) glucose and (c, f, i) fructose solutions as functions of solute concentration (°Brix) and temperature (K).....	85
Figura 5.3. Prandtl number (Pr) for (a) sucrose, (b) glucose and (c) fructose solutions as functions of solute concentration (°Brix) and temperature (K).....	91
Figura 6.1. Experimental apparatus used for determining solubility of sucrose and maltitol in water.....	106
Figura 6.2. Solubility of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.....	111
Figura 6.3. Density of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.....	113
Figura 6.4. Viscosity of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.....	115
Figura 6.5. Specific heat of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.....	117
Figura 6.6. Thermal conductivity of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.....	118
Figura 6.7. Thermal diffusivity of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.....	120
Figura 7.1. Aparato experimental utilizado para a desidratação osmótica a) convencional (OD); b) agitada mecanicamente (AGOD); e c) assistida por ultrassom (USOD).....	144

Figura 7.2. Efeito da temperatura sobre a perda de água (WL) do gengibre durante a desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD).....	148
Figura 7.3. Efeito da temperatura sobre o ganho de sólidos (SG) do gengibre durante a desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD).....	149
Figura 7.4. Efeito da desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD) sobre a WL do gengibre...	150
Figura 7.5. Efeito da desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD) sobre o SG do gengibre...	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Estudos sobre desidratação osmótica assistida por ultrassom em frutas e vegetais nos aspectos de transferência de massa.....	36
Tabela 4.2. Estudos sobre secagem com pré-tratamento de desidratação osmótica assistido por ultrassom em frutas e vegetais nos aspectos de transferência de massa	37
Tabela 4.3. Estudos sobre secagem assistida por ultrassom em frutas e vegetais nos aspectos de transferência de massa	38
Tabela 5.1. Mathematical models used to fit the experimental data of density, specific heat and thermal conductivity of sucrose, glucose and fructose solutions.....	82
Tabela 5.2. Means and standard deviation for the density of sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.....	83
Tabela 5.3. Means and standard deviation for the specific heat of sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.....	86
Tabela 5.4. Means and standard deviation for the thermal conductivity of sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.....	88
Tabela 5.5. Calculated Prandtl numbers for sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.....	89
Tabela 5.6. Fitting parameters of the proposed models for density, specific heat and thermal conductivity.....	91
Tabela 5.S1. Dynamic viscosity for sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentration and temperatures (Telis et al., 2007).....	100
Tabela 6.1. Fitting parameters of best model to describe solubility, density, viscosity, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of the saturated solutions of sucrose and maltitol.....	121
Tabela 6.S1. Solubility of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).....	131
Tabela 6.S2. Density of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).....	132

Tabela 6.S3. Viscosity of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).....	133
Tabela 6.S4. Specific heat of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).....	134
Tabela 6.S5. Thermal conductivity of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).....	135
Tabela 6.S6. Thermal diffusivity of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).....	136
Tabela 7.1. Parâmetros do modelo Peleg para perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).....	153
Tabela 7.2. Parâmetros do modelo de Weibull para perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).....	154
Tabela 7.3. Parâmetros do modelo Z&L para perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).....	155

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
2. OBJETIVO	17
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. ORGANIZAÇÃO DA TESE	19
4. CAPÍTULO 1.....	23
5. CAPÍTULO 2.....	73
6 . CAPÍTULO 3	101
7. CAPÍTULO 4.....	137
8. CONCLUSÃO GERAL	160
9. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	162

1. INTRODUÇÃO GERAL

Dentre a grande variedade de alimentos produzidos no Brasil, parte possui produção regional e sazonal. A alta perecibilidade de frutas, tubérculos e raízes é a maior dificuldade encontrada pelos fornecedores e indústrias alimentícias durante sua cadeia de suprimento nas mais diferentes regiões. Durante a colheita e pós-colheita, fatores como a composição química do alimento e condições ambientais podem potencializar sua perecibilidade.

O gengibre, caracterizado como um rizoma subterrâneo, tem como característica sensorial principal a pungência - responsável pela sua percepção refrescante. A pungência está relacionada com compostos bioativos presentes nos óleos voláteis e compostos pungentes não voláteis. Esses compostos apresentam propriedades medicinais como antiúlcera, anti-inflamatórias, antináusea, antibacterianas, trazendo benefícios com o seu consumo. Tais compostos são predominantemente ativos no gengibre quando consumido *in natura*, em conserva, desidratado e como especiaria na fabricação de bebidas, balas, bolachas, bolos e temperos.

Por possuir alto teor de umidade, em torno de 78% (USDA, 2018), a redução da umidade e atividade de água do gengibre aumenta a estabilidade dos compostos bioativos e reduz a ação microbiana. Por essa razão, os processos de desidratação são utilizados desde a antiguidade até os dias atuais. Assim como qualquer outro processo, a desidratação passa por buscas constantes de otimização, com o objetivo de reduzir o tempo, consumo energético e melhorar a qualidade final do alimento. Diante disso, iniciaram-se estudos sobre técnicas combinadas de desidratação osmótica com aplicação de ultrassom. A desidratação osmótica pode ser caracterizada como um pré-tratamento à secagem. Ela contempla processos de transferência de calor e massa ao imergir o alimento em solução osmótica. Estes processos causam a redução da umidade do alimento, consequentemente facilitando a eventual secagem para assegurar melhor qualidade final.

Entretanto, o processo de desidratação osmótica é oneroso e exige longos tempos de processamento. Naturalmente, a força motriz destes processos é dada pela diferença de potencial químico do alimento e da solução osmótica, o qual é potencializado ao utilizar soluções no limite de saturação. Como técnicas auxiliares de intensificação desses processos e melhora da retenção das propriedades nutricionais e bioativas, a aplicação de ultrassom de alta intensidade têm sido destaque quando empregada em conjunto com processos convencionais. O ultrassom é classificado como uma tecnologia emergente, ou seja, uma tecnologia de inovação e de crescimento na área de alimentos. Na desidratação osmótica, ele pode potencializar a transferência de massa devido às alterações causadas na estrutura do alimento como consequência dos efeitos sonoquímicos.

O grau de intensidade dos efeitos sonoquímicos dependem não somente das condições do processo, mas também das propriedades do material tratado. Por isso, entender como as propriedades termofísicas das soluções osmóticas se comportam nas diferentes condições é de suma importância. Tais propriedades são responsáveis por potencializar ou prejudicar a cinética do processo, dependendo do material e condições.

Soluções osmóticas preparadas a partir de sacarose são muito utilizadas industrialmente. Entretanto, estudos vêm buscando possíveis substituições por outros solutos convencionais, como glicose, frutose e solutos, assim como não convencionais, como edulcorantes maltitol, xilitol e eritritol. Esta última classe vem ganhando espaço devido às demandas dos consumidores quanto à produção de alimentos com baixo valor calórico, visando atender dietas com redução calórica ou com restrições alimentares.

O maltitol, especificamente, é um edulcorante que pode ser utilizado em desidratação osmótica de frutas devido ao seu poder adoçante comparável à sacarose, baixo valor calórico, lenta absorção no trato digestivo, baixa higroscopicidade e por não apresenta sabor residual. Mesmo quando submetida à temperaturas mais altas, o uso do maltitol previne as reações de caramelização e escurecimento presentes ao empregar-se solutos convencionais. Por essas razões, seu emprego na desidratação osmótica são incipientes, principalmente ao avaliar seu comportamento na presença de tecnologias intensificadoras como o ultrassom. A desidratação de alguns alimentos já vem sendo estudados ao empregar tais soluções com bons resultados. Porém, até o nosso conhecimento, estes estudos ainda não foram realizados para o gengibre – principalmente no que diz respeito ao processo de transferência de massa.

Dessa forma, observou-se a necessidade de caracterizar e avaliar, inicialmente, as propriedades termofísicas de diferentes soluções osmóticas (convencionais e não-convencionais). A forma como se comportam mediante alterações na concentração e temperatura de processamento poderá contribuir ou retardar as cinéticas de transferência de massa, bem como nos mecanismos de atuação do ultrassom. Como base, este estudo buscou se especificar na desidratação osmótica do gengibre empregando soluções saturadas de maltitol, na ausência de agitação e na presença de agitação convencional ou com ultrassom de alta intensidade, como tecnologias intensificadoras.

2.OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar os mecanismos envolvidos na intensificação da desidratação osmótica para produção de gengibre desidratado por meio do uso de ultrassom de alta intensidade.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar e modelar as propriedades termofísicas (densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica) das soluções osmóticas aquosas de açúcares convencionais como sacarose, glicose e frutose em condições abaixo do ponto de saturação;
- Determinar e modelar as propriedades termofísicas (solubilidade, densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica) de soluções osmóticas saturadas convencionais de sacarose e não convencionais de maltitol;
- Avaliar a influência da agitação mecânica e do uso de ultrassom nas cinéticas de desidratação osmótica de gengibre com solução saturada de maltitol em diferentes temperaturas.

3.ORGANIZAÇÃO DA TESE

O plano de trabalho conduzido que constitui a presente tese é apresentado na Figura 3.1. Neste esquema, mostram-se os quatro principais capítulos que abordam desde a caracterização das soluções osmóticas até o objetivo final de intensificação da desidratação osmótica.

O Capítulo 1, especificamente, apresenta uma revisão da literatura sobre o uso do ultrassom como pré-tratamento ou tecnologia assistente ao processo de desidratação de frutas e vegetais, seja na etapa de desidratação osmótica ou de secagem. Além disso, foi abordado como uso do ultrassom pode interferir na eficiência do processo e nos parâmetros de qualidade dos produtos vegetais.

O Capítulo 2 apresenta os resultados da determinação e avaliação das propriedades termofísicas de soluções aquosas de carboidratos simples convencionais: sacarose, glicose e frutose. Densidade, calor específico, condutividade térmica e número de Prandtl foram determinados e analisados em concentrações variando entre 10 e 60 °Brix e temperaturas entre 273,15 e 358,15 K, condições mais amplas das reportadas na literatura previamente. Modelos matemáticos empíricos foram ajustados aos dados experimentais para representar e auxiliar na compreensão de como tais propriedades se comportam mediante variações na temperatura e na concentração de sólidos.

Em seguida, no Capítulo 3, são apresentadas as propriedades de transporte de soluções saturadas convencionais de sacarose e não convencionais de maltitol em função da temperatura. O emprego de soluções saturadas busca maximizar o gradiente de concentrações e, portanto, a transferência de massa. Além de ausência destes dados na literatura, é importante conduzir uma análise de como as propriedades termofísicas se alteram com variações simultâneas na temperatura, solubilidade e, logo, na concentração final das soluções. Por isso, foram investigadas as propriedades de transporte de massa (solubilidade em água e densidade), transporte de quantidade de movimento (viscosidade dinâmica) e transporte de energia (calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica). Uma ampla faixa de temperatura (273,15 a 353,15 K) foi considerada para a determinação das propriedades de transporte. Posteriormente, modelos teóricos e empíricos foram ajustados aos dados experimentais para prever seus valores e comportamento frente às possíveis alterações nas condições do processo.

Por fim, no Capítulo 4, é apresentada a cinética de desidratação osmótica de gengibre em condições convencionais, na presença de agitação mecânica e com a aplicação de ultrassom de alta intensidade. Os experimentos foram conduzidos utilizando soluções saturadas de maltitol nas temperaturas de 25, 35 e 45 °C. As cinéticas de perda de água e

ganho de sólidos foram analisadas em um período de 24 horas. Foi realizada a modelagem matemática dos dados experimentais com o modelo de Peleg, Weibull e Z & L.

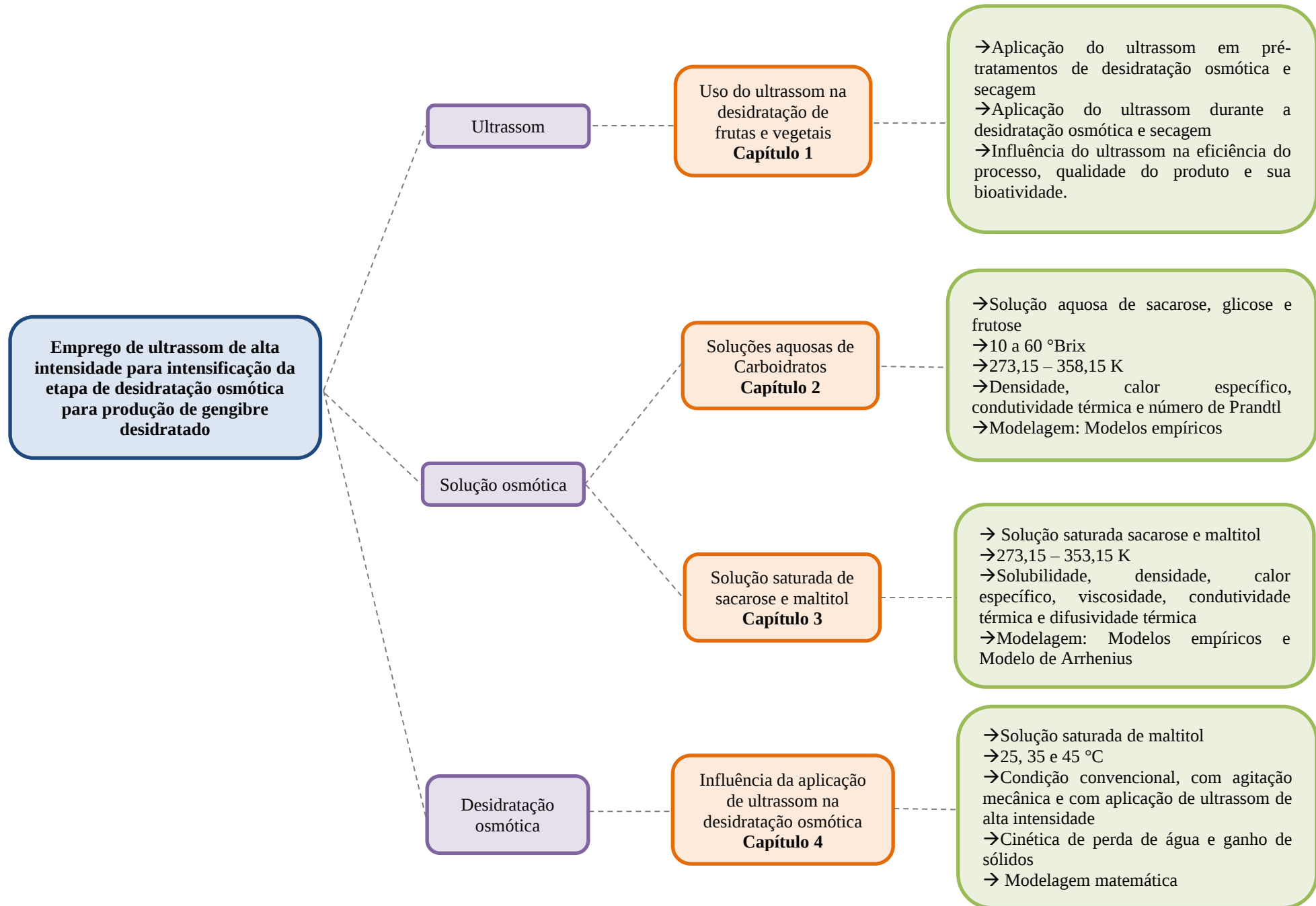


Figura 3. 1. Organização dos capítulos apresentados na presente tese de doutorado.

4.CAPÍTULO 1

Uso do ultrassom na desidratação de frutas e vegetais: Uma revisão sobre seu impacto na eficiência do processo e nos parâmetros de qualidade do produto final

Maria Julia Neves Martins ¹; Marcio Augusto Ribeiro Sanches ¹; Tiago Carregari Polachini ¹; Javier Telis-Romero ¹

¹ Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brasil.

Resumo: A desidratação de alimentos é uma das técnicas de conservação mais antiga que vem sendo aprimorada devido às exigências da indústria e do consumidor. A secagem convectiva convencional é uma das técnicas mais primitivas que pode ser otimizada com a inserção de etapas prévias da desidratação osmótica. Atualmente, a utilização de tecnologias emergentes, como o ultrassom, mostra-se eficiente na intensificação do processo de remoção de água. O ultrassom é capaz de acelerar os processos e reduzir danos indesejáveis devido aos mecanismos diretos e indiretos. Ele pode ser aplicado em diferentes etapas do processo de desidratação, desde a desidratação osmótica até a secagem convencional, funcionando como pré-tratamento ou tecnologia assistente. Dependendo das características do alimento e das condições de processamento, o ultrassom pode favorecer a cinética da perda de água e ganho de sólidos pelo alimento. Como resultado, melhoras são reportadas na retenção da cor, das propriedades antioxidante, textura e percepção sensorial. Visto que frutas e vegetais são um dos alimentos mais susceptíveis às alterações de processo, é de grande valia revisitar a literatura para reunir informações necessárias à otimização dos processos e da qualidade final do produto.

Palavras-chave: Cavitação; Tecnologia emergente; Técnicas de secagem; Propriedades de qualidade

4.1. Introdução

A desidratação de alimentos é um método tradicional de conservação e aumento de vida de prateleira de alimentos. Isso se deve à redução da umidade e da atividade de água do produto. Elas são as principais propriedades responsáveis pelas reações bioquímicas causadoras de deterioração dos alimentos, como oxidação lipídica, reações enzimáticas e desenvolvimento de microorganismos nos alimentos (JAYAS, 2016; SZADZIŃSKA; MIERZWA; MUSIELAK, 2022). Além de aumentar a vida de prateleira, a redução na atividade de água acaba reduzindo também a massa, espaço na embalagem, gastos com transporte e armazenamento (PANDISELVAM et al., 2023). Além disso, a desidratação pode melhorar a palatabilidade, digestibilidade, e muitas vezes a cor, sabor e aparência são semelhantes ao produto fresco (JAYS, 2016).

A desidratação osmótica (OD) e secagem convectiva, ou ambos em conjunto, são os processos mais comumente aplicados para a desidratação de alimentos. A desidratação osmótica (OD) é um método simples de desidratação parcial, realizada ao colocar o alimento em contato com uma solução aquosa concentrada denominada de solução osmótica (SALEHI, 2023). O processo realizado de maneira convencional tem rendimento restrito e necessita de técnicas complementares para intensificar a transferência de massa, reduzindo o tempo de processamento e preservando a qualidade do produto final (MA et al., 2021). A secagem convectiva, por outro lado, apresenta um fator limitante que é a temperatura elevada que causa a degradação dos compostos bioativos (carotenóides, tocoferóis, polifenóis e vitamina C) devido às características termolábeis (SARPONG et al., 2018). Altas perdas de calor são comumente observadas neste tipo de processo, levando a baixa eficiência energética e taxas reduzidas de secagem (SZADZIŃSKA; MIERZWA; MUSIELAK, 2022). A secagem em temperaturas inferiores aparece como possível solução, porém é necessário um longo período de secagem – tornando-o desvantajoso industrialmente.

Ainda, é proposta a técnica de osmo-secagem com o objetivo de contemplar as vantagens da desidratação osmótica ao ser aplicada como pré-tratamento para promover uma secagem em temperaturas amenas. A redução prévia da atividade de água do produto imerso reduz seu tempo de exposição às altas temperaturas de secagem, além da possibilidade de criar barreiras protetoras para os compostos bioativos. Embora as vantagens destacadas, o longo tempo associado ainda é alvo de estudos e passível de tecnologias intensificadoras.

O ultrassom, especificamente, é uma tecnologia emergente não térmica desde que se tenha o controle da temperatura, considerada segura, não tóxica e com impacto reduzido ao meio ambiente (PATEIRO et al., 2022). Ela pode ser utilizada como técnica complementar, tanto na desidratação osmótica (SALEHI, 2023) como na secagem convectiva (SZADZIŃSKA et al., 2019). Na desidratação osmótica, o ultrassom intensifica a transferência de massa, aumenta a taxa de desidratação, reduz a carga microbiana, preserva o composto físico-químico, bioativo e a capacidade antioxidante do vegetal (RAHAMAN et al., 2019). Na secagem, benefícios similares podem ser obtidos pela aplicação do ultrassom, reduzindo as condições de exposição do alimento sensíveis ao calor, aumentando a taxa de secagem (MOUSAKHANI-GANJEH et al., 2021), intensificando a eficiência e eficácia de produção, reduzindo gasto de energia (SZADZIŃSKA; MIERZWA; MUSIELAK, 2022), além da possibilidade de se empregar temperaturas mais amenas.

Os banhos ultrassônicos e os sistemas tipo sonda são os dois tipos de equipamentos utilizados para a emissão de ondas ultrassônicas. Densidade de energia acústica, potência, intensidade, frequência ultrassônica e o modo de operação (ciclos programados de liga/desliga) são parâmetros que devem ser definidos para realizar os experimentos (SINGLA; SIT, 2021), e que vão influenciar diretamente no processo e na qualidade do produto final. Essas condições podem promover alterações distintas de acordo com o equipamento utilizado, tipo de meio de propagação das ondas ultrassônicas e o tipo de alimento, principalmente no que diz respeito a sua estrutura. Os dois tipos de equipamentos são amplamente utilizados na desidratação osmótica (DEGHAN; KENARI; STUDENT, 2021), porém na secagem é utilizado apenas a sonda ultrassônica com duas formas de aplicação: contato e aéreo (TAO et al., 2021). Estes equipamentos podem ser empregados para incorporar o ultrassom como tecnologia assistente ou como pré-tratamento às técnicas convencionais.

Como existe uma ampla variedade de condições de processamento e frutas e vegetais, de características distintas, esta revisão buscou reunir resultados variados satisfatórios e não satisfatórios na literatura. Com isso, o maior desafio é determinar parâmetros de processamento para obter produtos com maior durabilidade, mantendo as características finais de qualidade o mais semelhante possível ao alimento fresco.

4.2. Ultrassom

4.2.1 Generalidades

O som é uma onda acústica de pressão que se propaga de maneira unidimensional com maior velocidade em meio sólido, reduzindo-se gradativamente no meio líquido e gasoso (KASAAI; KASAAI, 2013).

O ultrassom pode ser obtido a partir da conversão de diferentes formas de energia, como a energia elétrica e mecânica em energia acústica (CARLIN, 1972). O transdutor é o componente básico empregado na geração de ultrassom, sendo responsável por esta conversão de energia. Existem dois tipos principais de transdutores, os piezoelétricos e os magnetostrictivos, sendo piezoelétrico o mais utilizado nos equipamentos de laboratório (KOBUS; KUSÍŇSKA, 2008) devido sua eficiência e simplicidade (RECUERO, 1995). O princípio básico de um transdutor piezoelétrico é que, quando o material piezoelétrico (quartzo e a turmalina, por exemplo) é submetido a uma carga elétrica, ele sofre alterações nas dimensões desses cristais devido ao realinhamento das moléculas polarizadas, produzindo os ultrassons (CHEE; TONG; STEVEN, 2016).

A frequência com que o som se propaga no meio tem um papel importante no tipo de aplicação e em suas atividades específicas. Analisando a escala de frequência de ultrassom três faixas de frequência podem ser consideradas. A primeira vai de 0 a 20 Hz, caracterizando o infrassom; a segunda vai de 20 Hz a 20 kHz referente audição humana, e: a terceira faixa é $\geq 20\text{kHz}$, classificada como ultrassom de potência ou de diagnóstico. É na faixa de ultrassom de potência que os equipamentos são capazes de gerar campo acústico (CAPOTE; CASTRO, 2006; FENG, BARBOSA-CÁNOVAS e WEISS, 2011). Ainda, o espectro do ultrassom de potência pode ser subdividido em duas zonas: baixa frequência (20–100 kHz) e alta frequência (100 KHz a 1 MHz). O ultrassom de alta frequência (100 KHz a 1 MHz) produz baixa intensidade acústico (geralmente $<1\text{ W.cm}^{-2}$). Por outro lado, o ultrassom de baixa frequência (20–100 kHz) produz níveis de intensidade mais elevados ($10\text{--}1000\text{ W.cm}^{-2}$).

Na indústria de alimentos é utilizado, tanto o ultrassom de baixa intensidade, como o de alta intensidade. O ultrassom de baixa intensidade ($\leq 1\text{ W/cm}^2$) é aquele que se propaga pelo material de modo instantâneo, não causando modificações nas propriedades físicas e químicas do alimento. Ele é mais frequentemente utilizado em processos para determinação de composição e propriedades físico-químicas dos alimentos. Por outro lado, o ultrassom de alta intensidade pode causar alterações físicas e químicas no meio durante sua propagação, que podem ser desejáveis ou indesejáveis em um produto ou processo. A alta intensidade é geralmente usada em processos de

homogeneização, inibição enzimática, extração, emulsificação e ruptura celular para intensificação de processos (AWAD et al., 2012; MCCLEMENTS, 1997). Essas alterações são causadas, principalmente, pelos mecanismos de cavitação, microagitação e aquecimento.

A cavitação é um dos fenômenos mais conhecidos que ocorre com a aplicação de ultrassom de alta intensidade (LEIGHTON, 1998). A partir da recepção das ondas ultrassônicas no meio líquido, as moléculas sofrem compressão e descompressão. Na etapa de compressão, as moléculas permanecem mais próximas devido ao aumento da pressão enquanto que, na descompressão, as moléculas se afastam devido ao vácuo formado – originando-se, então, as chamadas bolhas de cavitação (MASON; CORDEMAN, 1996).

A cavitação pode ser classificada como cavitação estável e instável (ou transitória) de acordo com o comportamento das bolhas de cavitação. Ela é considerada como estável quando as bolhas de cavitação são de tamanho estável, causando apenas microagitação do meio. A cavitação transitória apresenta bolhas de tamanho instável, fato que gera implosão durante sua transição no meio e a consequente elevação da temperatura e pressão pontual (5000 K e 1000 atm), cisalhamento e turbulência (LEIGHTON, 1998). A cavitação estável é propícia em meios em que as ondas ultrassônicas são de alta frequência e/ou baixa intensidade. Situações opostas descrevem meios propícios para cavitação transitória (LEIGHTON, 1998).

Os efeitos descritos de microagitação, cavitação e aquecimento estão mais relacionados ao meio líquido, por onde se propaga o ultrassom. Estes, de caráter indireto, são responsáveis por causar importantes alterações na interface sólido-líquido (MIANO et al., 2016). Diferente dos efeitos indiretos, o efeito esponja é um efeito direto comum quando se utiliza ultrassom em sistema líquido-sólido. O material sólido, ao sofrer a ação do ultrassom, passa por etapas de compressão e descompressão simultaneamente da mesma maneira quando se aperta uma esponja. Este efeito causa alteração na estrutura (CÁRCEL et al., 2012; GALLEGU-JUÁREZ, 1999) devido à formação de micro canais na superfície, resultante das ações superiores à tensão superficial (MURALIDHARA; ENSMINGER; PUTNAM, 1985). Este tipo de efeito é desejável quando o foco do processo é a transferência direta de massa do meio líquido para o meio sólido, ou vice-versa.

4.2.2. Equipamentos comumente utilizados

O ultrassom pode ser produzido por diferentes equipamentos ou sistemas de aplicação. Dependendo do produto ou processo, um sistema pode ser mais vantajoso que outro. Os sistemas mais empregados são os banhos ultrassônicos e os sistemas do tipo sonda.

O banho ultrassônico é o equipamento de ultrassom de potência mais comumente utilizado em laboratórios para realização de pesquisas. Esse fato se atribui ao seu baixo custo de aquisição, manutenção, facilidade de manuseamento, econômico (MULET et al., 1999) e por apresentar aplicação em diferentes processos e análises. O equipamento possui um tanque de aço inoxidável composto por transdutores em sua base. A quantidade e tamanho dos transdutores variam de acordo com a frequência e intensidade desejada. Um sistema de operação é implantado para controlar a energia elétrica necessária para as condições desejadas. As ondas ultrassônicas geradas pelos transdutores passam pela base do tanque e, posteriormente, são dispersas no meio. Com isso, as amostras podem ser tratadas de forma direta ou indireta, ou seja, com a amostra dispersa no tanque ou em um recipiente intermediário, respectivamente.

O sistema de sonda ultrassônica, por outro lado, é outro equipamento de ultrassom de potência utilizado em processos que necessitam de uma maior potência. O gerador controla a frequência e a potência de entrada ao transdutor piezoelétrico, onde ocorre a conversão da energia elétrica em mecânica e, em seguida, em energia acústica. A sonda é o elemento responsável pela condução e direcionamento das ondas ultrassônicas ao meio. Elas são emitidas pela ponta da sonda e/ou pelos “nós”, dependendo da configuração da sonda. Esse equipamento apresenta controle de potência e opções de dispersão de ultrassom de forma pulsada ou direta (PINJARI; PANDIT, 2010).

A alta potência capaz de ser produzida pelo sistema tipo sonda faz com que o grau de cavitação seja tão elevado que gera erosão na sonda. Por esse motivo, as sondas devem ser fabricadas com materiais resistentes e com baixa perda acústica (CARCEL CARRIÓN, 2003; LINGYU YU; GIURGIUTIU, 2009). Atualmente as ligas de titânio são as mais utilizadas para a fabricação das sondas ultrassônicas. Nesse sentido, a manutenção deste tipo de sistema passa a ser mais onerosa quando comparado aos banhos ultrassônicos.

Entretanto, independentemente do sistema de aplicação, é necessário fazer uma avaliação da eficiência de conversão da energia nominal aplicada para a energia acústica realmente produzida e absorvida pelo meio. Parte da energia nominal é parcialmente

perdida na forma de ruído, aquecimento, vibração e deve ser avaliada por métodos adequados no momento da escolha do melhor equipamento a ser empregado.

4.2.3. Determinação do campo acústico

Como visto anteriormente, a energia fornecida pelo gerador passa por uma série de conversões até se transformar em energia acústica. Porém, durante essas conversões, ocorrem algumas perdas de energia. Por esse motivo, é essencial a determinação da potência acústica real transmitida e das perdas ao longo do processo (GUIMARÃES et al., 2020; POLACHINI et al., 2021a).

De acordo com Berlan and Mason (1996) existem diversos métodos de determinação do campo acústico: Métodos térmicos (termopares), métodos que levam em consideração efeitos secundários de propagação do som e cavitação (ruídos), efeitos mecânicos diretos (velocidade de partículas) e medidas no transdutor (medidas elétricas).

O método calorimétrico, classificado como um método térmico é o mais utilizado e confiável para a determinação da potência acústica em meios líquidos apresentando variação inferior a 5% para repetitividade (RASO et al., 1999). Vários pesquisadores utilizaram esta técnica para a mesma finalidade em diferentes processos e produtos (CÁRCEL et al., 2007; KANG et al., 2016; KEK; CHIN; YUSOF, 2013; NOWACKA et al., 2017; POLACHINI et al., 2021b; VILLA-VÉLEZ et al., 2018). De maneira geral a elevação da temperatura do meio está relacionada com a resistência das moléculas ao receberem as ondas ultrassônicas, apresentando comportamento linear com a variação do tempo (RASO et al., 1999).

Dessa forma, a potência acústica é determinada a partir da Equação (4.1) (RASO et al., 1999) em que o termo de variação de temperatura está relacionado com a conversão da energia ultrassônica em energia térmica.

$$P = m \cdot Cp \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

em que m é a massa do meio, Cp é o calor específico do meio e dT/dt é a variação de temperatura em um intervalo de tempo causada pela aplicação do ultrassom. Por isso, ao utilizar esse método para avaliação da eficiência acústica, é necessário conhecer informações sobre as propriedades físicas do meio de trabalho.

O aparato experimental é composto por um ou mais termopares distribuídos ao recipiente em que as amostras serão dispostas com o objetivo de realizar uma varredura de temperatura ao longo do meio. Os dados devem ser coletados nos primeiros 90 segundos de aplicação do ultrassom (POLACHINI et al., 2021a).

O hidrofone, por outro lado, é um equipamento utilizado para determinação do campo acústico que leva em consideração a pressão acústica exercida no meio, efeitos secundários decorrentes da propagação do som e cavitação. O método apresenta desvantagens dependendo do material que é fabricado e do meio de medida. O hidrofone de fibra óptica apresenta sensibilidade inferior. Os materiais cerâmicos piezoelétricos necessitam do conhecimento dos parâmetros do transdutor, como as dimensões físicas, impedância acústica e o fator de acoplamento. Além desses, existem os hidrofones de membrana, porém são muito suscetíveis a falhas mecânicas (MISTEWICZ et al., 2021).

O método que se baseia em medidas elétricas pode ser empregado, porém necessita de um ambiente de câmara anecoica em que as medições ocorrem a partir de carga e descarga. Apresenta desvantagem por não ser reproduzível em intensidades acústicas muito baixa ou muito alta, além do longo tempo de execução do método (BERLAN, J.; MASON, 1996).

Medições mecânicas podem ser realizadas com a adaptação de captadores no transdutor para adquirir medições de força, velocidade e diferença de fases. É um método bastante indicado e, por vezes, mais preciso para os meios sólidos (BERLAN, J.; MASON, 1996).

Na desidratação osmótica as ondas acústicas se dispersam na solução, tornando as medições mecânicas inapropriadas, já que é indicada para meios sólidos. Dessa forma, o método calorimétrico se destaca para determinar a potência nominal no processo de desidratação osmótica assistida por ultrassom.

4.3. Ultrassom como pré-tratamento à desidratação osmótica

Por apresentar um gasto energético relativamente alto, muitos processos optam por empregar o ultrassom somente como um pré-tratamento à desidratação osmótica. Seu principal foco é preparar e modificar material para promover uma transferência de massa facilitada durante o processo convencional posterior. Este pré-tratamento pode ocorrer em água ou nas próprias soluções osmóticas empregadas na desidratação osmótica.

Bozkir et al. (2019) avaliaram a secagem de caqui após a desidratação osmótica com pré-tratamento ultrassônico. Duas concentrações de solução de sacarose foram utilizadas, 45 e 70 °Brix. Antes da desidratação osmótica convencional, foi realizado o pré-tratamento com a aplicação de ultrassom utilizando a solução de 45 °Brix. Este pré-tratamento foi realizado em banho ultrassônico por 10, 20 e 30 minutos com frequência de 35 kHz, potência de 480 W a 30 °C. Após sonicação na solução de 45 °Brix, as amostras foram agitadas e mantidas na solução por mais 180 min para o tratamento controle e 10 min. de sonicação e 240 min para o tratamento com 20 e 30 min. de sonicação. Como posterior, foi realizada a desidratação osmótica convencional em uma solução osmótica de 70 °Brix sob agitação até atingir o equilíbrio. O pré-tratamento ultrassônico apresentou perda de água de 7,65 a 10,45% e ganho de sacarose de 5,35 a 5,83%, conforme a condição aplicada. Após sonicação ainda na solução de 45 °Brix com agitação de até 240 min foi relatado aumento da perda de água de 28,21 a 30,09% devido a presença de pressão osmótica entre a solução de sacarose e a fruta, formação de microcanais e aderência celular.

Oladejo et al. (2017) avaliaram os efeitos dos pré-tratamentos com ultrassom na cinética de transferência de massa de batata doce. Três condições experimentais foram investigadas, aplicação de ultrassom durante a imersão de batata doce em água e a desidratação osmótica em solução de sacarose a 35°Brix com e sem aplicação de ultrassom. O dispositivo ultrassônico foi modelo sonda com 300 W de potência e 28 kHz de frequência com sistema pulsado (10 s on; 2 s off) durante 20, 30, 45 e 60 min. Os procedimentos foram realizados a 30°C. A imersão em água não teve efeito significativo na estrutura e apresentou aumento de retenção de vitamina C (>70 %). Em relação a transferência de massa, ela apresentou ganho de água e perda de sólidos – comportamento inverso ao tratamento com solução de sacarose.

Azoubel et al. (2010) avaliaram o pré-tratamento ultrassônico na cinética de secagem de banana. O pré-tratamento ultrassônico foi realizado em banho ultrassônico com frequência de 25 kHz, com a imersão da fruta em água, sem agitação mecânica durante 10, 20 e 30 min. a 30°C. Foi apresentado comportamento semelhante a Oladejo et al. (2017) em relação a transferência de massa, ou seja, ganho de água e perda de sólidos. A fruta apresentou ganho de teor de umidade de 5,17 % com 30 min. de pré-tratamento ultrassônico. Fernandes e Rodrigues (2007) avaliaram o pré-tratamento ultrassônico com a mesma matéria prima e com condições semelhantes a Azoubel et al.

(2010) e obteve a mesma tendência de transferência de massa com ganho de água de 7,2 % e perda de sólidos de 21,3 %.

Fernandes, Linhares Jr e Rodrigues (2008) realizaram pré-tratamento ultrassônico em pedaços abacaxi. O fruto foi imerso em água a 30°C e o tratamento ultrassônico foi realizado por 10, 20 e 30 min. em banho ultrassônico com frequência de 25 kHz e a intensidade de 4870 W/m². Foi apresentado comportamento oposto a Azoubel et al. (2010), pois ocorreu a perda de água (2,1 a 3,2 %). Este comportamento pode ser justificado devido a diferentes tipos de estruturas dos alimentos pré-tratados. Além disso, foi relatado a perda de açúcar que variou de 21,7 a 23,2 %.

4.4. Ultrassom aplicado nos processos de desidratação

A desidratação é uma técnica de preservação de alimentos em que consiste na redução do teor de água e tem como objetivo reduzir a atividade de água. Isso aumenta a vida útil dos alimentos, inibe o crescimento de microorganismos e reduz o peso e o espaço durante o transporte e armazenamento. Esta técnica é muito utilizada em alimentos devido à alta perecibilidade dos alimentos vegetais pós-colheita (PANDISELVAM et al., 2023).

A secagem com ar quente é a técnica mais convencional para a desidratação de alimentos, mas apresenta desvantagens como tempo de processamento prolongado e, consequentemente, altos gastos energéticos e efeitos indesejáveis na qualidade sensorial e nutricional do alimento (DA CUNHA et al., 2020).

Dadas as dificuldades de cada método, surgiram tecnologias não convencionais com objetivo de intensificar a desidratação e reduzir alguns danos associados ao processo convencional. O ultrassom é uma dessas tecnologias e apresenta resultados satisfatórios, principalmente nos processos de desidratação de frutas e vegetais (DA CUNHA et al., 2020).

O ultrassom pode ser aplicado como pré-tratamento à um dos processos ou de forma assistida. Em ambos os tipos de processamento são apresentados resultados satisfatórios. O pré-tratamento, porém, atua preparando a estrutura externa do alimento para promover uma acelerada transferência de massa. O método concomitante de aplicação de ultrassom, além da alteração constante na estrutura do alimento, promove microagitação para reduzir o tempo de remoção de água e permitindo o emprego de temperaturas inferiores às aquelas comumente aplicadas (HUANG et al., 2020).

Por isso, buscou-se apresentar alguns estudos recentes relacionados à aplicação do ultrassom de alta intensidade em processos de desidratação de frutas e vegetais, incluindo os subtópicos de desidratação osmótica, osmo-secagem e secagem. A literatura foi revisitada para proporcionar informações sobre a influência das condições de processamento na transferência de massa e qualidade do produto final. Primeiramente, serão abordados às questões associadas aos processos de desidratação osmótica, secagem e osmo-secagem. Em um segundo momento, serão discutidos os efeitos da aplicação do ultrassom nas propriedades dos materiais tratados. Todas estas informações foram compiladas nas Tabelas (4.1), para desidratação osmótica, Tabela (4.2) para os processos de osmo-secagem e Tabela (4.3) para secagem assistida por ultrassom.

Tabela 4.1. Estudos sobre desidratação osmótica assistida por ultrassom em frutas e vegetais nos aspectos de transferência de massa.

Produto	Potência	Tempo de duração (min.)	Def água (m ² /s)	Def soluto (m ² /s)	Efeito do ultrassom	Referência
Abacaxi	55,5 kW/m ³ , 40 kHz	20; 40	-	-	Intensificou a transferência de massa durante O.D.; Não intensificou a taxa de secagem convectiva devido ao aumento da resistência externa.	(CORRÊA, et al., 2017)
Batata doce Beauregard (<i>Ipomoea batatas Lam</i>)	25 kHz / 4870 W/m ²	10	-	-	Tempo de secagem reduzido; Diminuiu a taxa de secagem; Menor perda total de carotenoides.	(INFANTE et al., 2021)
Tomate	25 kHz; 8 kW m ⁻³	10; 20; 30 e 40	-	-	Alteração na estrutura celular; Influenciou na transferência de massa e nos parâmetros de cor.	(CORRÊA, et al., 2015)
Cenoura	21 kHz → 3 W/cm ² e 35 kHz → 4 W/cm ²	10; 20 e 30	4,40-4,60·10 ⁻¹⁰	-	Alterações na microestrutura da cenoura e na cor; Aumento substancial de carotenoides.	(NOWACKA; WEDZIK, 2016)
Kiwi	25 kHz	120	-	-	Maior eficiência na transferência de massa foi nos primeiros 30 min.; Maior P.A. e G.S..	(KROEHNKE et al., 2021)
Ameixa	25 kHz → 40% e 99% de potência	30; 60	-	1,71-1,92·10 ⁻⁸	Aumentou a P.A., o G.S. e o coeficiente de difusão do soluto; Redução de umidade, taxa de secagem, atividade fenólica e antioxidante da sacarose.	(RAHAMAN et al., 2019)
Groselha indiana (<i>Phyllanthus emblica L.</i>)	40 kHz e 150 W;	10	1,01 – 1,92· 10 ⁻⁹	2,49- 2,73·10 ⁻¹⁰	Aumentou a transferência de massa, difusão da água e a impregnação das partículas de soluto; Perda de vitamina C e a mudança de cor	(MEHTA et al., 2021)
Morango	45 Hz 180, 240, 360 W	15	-	-	Aumentou da P.A. e G.S. com o aumento potência ultrassônica; Redução do tempo de secagem; Melhorou a taxa de retenção de polifenóis totais, textura e qualidade nutricional.	(JIANG et al., 2021)
Maçã	(40 kHz, 80 kHz, 40 + 80 kHz) e intensidades (25 W/L, 50 W/L, 75 W/L)	360	-	-	Dupla frequência proporcionaram maior retenção de compostos fenólicos e atividade antioxidante; Maior P.A. e G.S..	(MA et al., 2021)
Cranberries	21 kHz; 180 W. 50 g de frutos; 3,6 W/g.	30; 60	-	-	Degradação de compostos bioativos; Maior tempo de aplicação de ultrassom maior degradação da vitamina C;	(NOWACKA et al., 2018)
Manga	25 kHz; 55 kW/m ³	5; 10; 20; 30; 40	7,23 – 5,94·10 ⁻⁹	-	P.A. variou de 0,4 e 20,6% e o G.S. entre 9,7% a 64,9% dependendo da concentração da solução e tempo de processo; 30-40 mim foi interrompida a transferência de massa.	(FERNANDES et al., 2019)
Goiaba chilena	130 kHz	60; 120	-	-	Microestrutura da casca do fruto foi afetada; Perda de adesão celular; Maior atividade antioxidante foi obtida após tratamento com ultrassom.	(PIRCE et al., 2021)
Pêssego	28 kHz; 70 W	10; 20; 60	1,345 × 10 ⁻⁹ – 5,370 × 10 ⁻¹⁰	-	Reduz o tempo de secagem em até 40%; Reduziu o módulo de elasticidade em cerca de 46%; Mudança de cor não significativa.	(AKHOUNDZADEH YAMCHI; YEGANEH; KOUCHAKZADEH, 2022)

Tabela 4.2. Estudos sobre secagem com pré-tratamento de desidratação osmótica assistido por ultrassom em frutas e vegetais nos aspectos de transferência de massa.

Produto	Potência	Tempo de duração (min.)	Def água (m ² /s)	Def soluto (m ² /s)	Efeito do ultrassom	Referência
Kiwi	25 kHz	120	-	-	Aumento significativo na taxa de secagem; Redução do tempo em 28%; Maior degradação da cor; Aumentou a retenção de carotenóides e polifenóis.	(KROEHNKE et al., 2021)
Ameixa Sanhua	40 kHz; 0,45, 0,90 e 1,35 W/g	15	1,45 a 1,59 · 10 ⁻⁹	-	Redução do tempo de secagem; Melhor taxa de secagem; Maior difusividade efetiva da água; Diminuiu a dureza e a mastigabilidade; Baixa intensidade de ultrassom exibiu maior capacidade antioxidante e retenção fenólica total.	(LI et al., 2021)
Caqui	25 kHz; 8 kWm ⁻³	0; 10; 30	21,73 · 10 ⁻¹⁰	-	Redução do tempo de secagem; Causou modificações estruturais.	(CORRÊA et al., 2021b)
Caqui	35 kHz; 480 W	10; 20; 30	6,572 - 9,834 · 10 ⁻⁹	-	Maior P.A., G.S., taxas de secagem e difusividade efetiva da água; Aumentou a taxa de reidratação enquanto diminuiu o conteúdo fenólico total.	(BOZKIR et al., 2019)
Ameixa Mirabelle	28 e 40 kHz; 160W	10; 30	7,36 e 6,17 · 10 ⁻⁹	-	Redução da umidade com 60 a 120 min. de aplicação de ultrassom; Redução de 20% do tempo de secagem.	(DEHGHANNYA; GORBANI; GHANBARZADEH, 2015)
Abóbora	53 kHz	40; 80; 120	-	-	Redução dos valores de reidratação; Alteração da cor.	(ÇAĞLAYAN; BARUTÇU MAZI, 2018)
Beterraba	24 kHz Banho: 40 kHz e potência de 132 W	Sonda: 5; 10; 15 Banho: 10; 20; 30	5,94 a 7,15 · 10 ⁻⁹	-	Redução de tempo total do processo de 26 e 24% para sonda e banho, respectivamente; Não houve diferença na textura entre os tratamentos; Tratamento com sonda (5min.) apresentou maior teor de antocianinas e menor atividade de água.	(BROMBERGER SOQUETTA et al., 2018)
Manga	25 kHz ;55 W/m 3	5; 10; 20; 30; 40	5,94 a 8,41 × 10 ⁻⁹	-	Ganho de 9,7% a 64,9% de sólidos solúveis; Maior transferência de massa nos primeiros 10 minutos de processamento por ultrassom; Redução da difusividade aparente da água; Após 20 minutos de processamento o ultrassom não é viável.	(FERNANDES et al., 2019)
Melão amargo	1.200 W	15	-	-	Melhorou a capacidade de reidratação e retenção de fenólicos totais; Redução da retenção do ácido ascórbico.	(JIN; ZHANG; SHI, 2018)

Tabela 4.3. Estudos sobre secagem assistida por ultrassom em frutas e vegetais nos aspectos de transferência de massa.

Produto	Tipo de U.S.	Dispositivo U.S	Características do U.S.	Método de secagem	Efeito do ultrassom	Referência
Abacaxi	Aéreo	Câmara de secagem cilíndrica vibratória	21,8 kHz; 31 kW·m ⁻³	Convecção	Intensificou a taxa de secagem; Redução da resistência interna e externa ao transporte de massa.	(CORRÊA et al., 2017)
Pimenta vermelha	Aéreo	Câmara de secagem cilíndrica vibratória	21,8 kHz; 20,5 kW/m ³	Convecção	Influenciou a transferência de massa (a difusividade efetiva e coeficiente de transporte de massa); Redução da capacidade antioxidante, conteúdo fenólico total e ácido ascórbico; Alteração da temperatura obteve resultados diferentes.	(CÁRCEL et al., 2019)
Framboesa	Aéreo	Secador híbrido equipado com ultra-som	26 kHz; 200 W	Convecção e Microondas	Mudanças físicas e microestruturais; Menor mudança de cor; Maior retenção de antocianina e melhor características de perfil de textura	(SZADZIŃSKA et al., 2019)
Amora	Aéreo e contato	Secador híbrido	20 kHz e 180,1 W/dm ²	Convecção	Acelerou o processo de secagem; Reduziu o consumo de energia; Aumentou as retenções de antocianinas e ácidos orgânicos.	(TAO et al., 2021)
Kiwi	Aéreo	Secador híbrido	26 kHz; 200W	Convecção	Redução de 28% do tempo de processo; Redução dos compostos bioativos (carotenóides e compostos fenólicos.); 51% de retenção média de carotenóides; 82% de retenção do teor de polifenóis totais.	(KROEHNKE et al., 2021)
Beterraba	Aéreo	Secador híbrido	26 kHz; 200 W	Convecção e Microondas	Redução do tempo de secagem; Melhorou a taxa de secagem; Influenciou positivamente a capacidade de transferência de calor e massa; Aparência atraente com melhor cor e maior retenção de betanina	(SZADZIŃSKA et al., 2020)
Jaca	Contato	Placa de vibração de ultrassom	20 kHz; 80 W	Convecção e infravermelho	Redução do tempo de secagem (25-31%); Retenção de vitamina C e do conteúdo fenólico total; Microestrutura mais porosa; Alteração insignificante da cor.	(WU et al., 2021)
Abacaxi	Contato	Sistema de vibração ultrassônica	40 kHz	Secagem solar	Redução do tempo de secagem; Taxa de evaporação máxima de 49 g/h; Eficiência térmica máxima de mais de 63%.	(THANOMPONGCHART; PINTANA; TIPPAYAWONG, 2022)
Cogumelos	Aéreo	Secador híbrido	26 kHz; 100 e 200W	Convecção	Melhorou a cinética da secagem convectiva; Maior difusão efetiva e coeficientes de transferência de massa; Maior teor total de polifenóis.	(SZADZIŃSKA; MIERZWA; MUSIELAK, 2022)

4.4.1 Desidratação osmótica

A desidratação osmótica é uma técnica convencional considerada de longa duração, pois a transferência de massa ocorre através da difusão e fluxo capilar devido à diferença de um potencial químico (CORRÊA et al., 2017). Com o intuito de melhoria contínua a técnica convencional de desidratação osmótica está sendo aprimorada devido às exigências de intensificação de processo na indústria alimentícia. A utilização de ultrassom na desidratação osmótica é denominada de técnicas combinadas e tem como objetivo melhorar a transferência de massa com a redução do tempo de processamento e consumo energético (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; CÁRCEL et al., 2012), reduzir atividade de água do produto (CORRÊA et al., 2010), desacelerar as reações microbianas ou enzimáticas (LLAVATA et al., 2020), reduzir a temperatura de uma possível secagem posterior, minimizando a degradação térmica, melhorando a estabilidade da cor, a intensificação do *flavor* e, portanto, a qualidade final do produto (RAOULT-WACK et al., 1994).

As soluções osmóticas convencionais são feitas a partir de sacarose e cloreto de sódio, tendo maior aplicação da sacarose no processamento de frutas (PATTANAPA et al., 2010) e o cloreto de sódio na salga de legumes (YADAV; SINGH, 2012; ZHU et al., 2022a). Soluções ternárias preparadas com mais de um soluto como, por exemplo, sacarose e cloreto de sódio também são utilizados em desidratação osmótica de frutas, vegetais e tubérculos (PESSOA et al., 2020).

A solução osmótica de sacarose é a mais utilizada em estudos de desidratação osmótica (BOZKIR et al., 2019; CORRÊA et al., 2017; FERNÁNDEZ; LOVERA; RAMALLO, 2020; FONG-IN et al., 2021; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ et al., 2022; RAHIMI; AHRARITABAS; ANSARIFAR, 2022; SINGH et al., 2022). Entretanto, a mesma vem sendo substituída por outros carboidratos, tais como glicose (MARTINS et al., 2020; MEENA; PRINCE; SREEJA, 2022; RASHID et al., 2020; ZHAO et al., 2016; ZONGO; KHALLOUFI; RATTI, 2021), frutose (CORRÊA et al., 2021b; LEAHU; GHINEA; ROPCIUC, 2021; MARTINS et al., 2020; MEENA; PRINCE; SREEJA, 2022; RAHMAN; SHARMA; SAID, 2022) e maltose (MA et al., 2022; RAHMAN; SHARMA; SAID, 2022; ZHAO et al., 2016). Esta substituição é devido à procura de agentes osmóticos que apresentam melhor desempenho na transferência de massa e melhor qualidade do produto final.

Ainda, novos edulcorantes vêm sendo explorados com o objetivo de substituir os carboidratos convencionais. Neste grupo estão aqueles considerados artificiais, como

acesulfame K, aspartame, ciclamato, sacarina e sucralose (MOORADIAN; SMITH; TOKUDA, 2017) e os naturais, como o eritritol, maltitol, xilitol, isomaltulose, palatinose, sorbitol, lactitol (BIALIK et al., 2020; CICHOWSKA-BOGUSZ et al., 2020; CORRÊA et al., 2021a; DE OLIVEIRA et al., 2017; DO CARMO et al., 2022; GIANNAKOUREOU; LAZOU; DERMESONLOUOGLOU, 2020; KROEHNKE et al., 2021; MACEDO et al., 2022; MALDONADO; GONZÁLEZ PACHECO, 2022; MENDONÇA et al., 2017). Esta substituição vem ocorrendo devido às exigências da indústria em busca de soluções osmóticas mais eficientes na desidratação e pelo consumidor por alimentos com redução calórica (KAUR et al., 2022). Essas soluções são a base de polióis, compostos orgânicos denominados de álcoois de açúcar com a estrutura composta por um grupo de hidroxila em cada átomo de carbono. Também chamados de poliálcoois, açúcares ou álcoois hidroxílicos, eles têm como característica principal um poder adoçante semelhante à sacarose, porém de menor teor calórico devido à lenta absorção (KOWALSKA et al., 2020). Podem ser encontrados na natureza, em frutas e vegetais, mas também podem ser produzidos industrialmente por meio da hidrogenação de açúcares (AWUCHI; ECHETA, 2019).

Os polióis são adoçantes e também apresentam alguns benefícios tecnológicos em sua aplicação como: inibição do escurecimento em processo de aquecimento, conservação da textura, umidade, uma sensação de frescor durante a degustação além de ser considerado agente probiótico e anticárie (GREMBECKA, 2015).

Por essa razão, as propriedades destas soluções emergentes vêm sendo recentemente exploradas com o objetivo de projetar os processos de desidratação osmótica de forma mais eficiente e adequada (DO CARMO et al., 2022; MARTINS et al., 2021), principalmente aqueles que envolvem a aplicação de ultrassom de potência.

Outra particularidade da aplicação do ultrassom para intensificação dos processos de desidratação osmótica é que esta pode ser realizada como um pré-tratamento à desidratação osmótica convencional ou de forma assistida. A escolha dependerá das condições de processo, dos efeitos desejados e da susceptibilidade do produto a possíveis alterações sensoriais indesejáveis. Nesse sentido, nesta revisão, serão abordadas as variáveis de processo nos dois diferentes métodos separadamente.

4.4.1.2. Ultrassom como tecnologia assistente à desidratação osmótica

A aplicação do ultrassom como tecnologia assistente durante a desidratação osmótica pode ser uma alternativa viável para promover uma maior intensificação do

processo do que apenas como pré-tratamento. Rahaman et al. (2019), por exemplo, realizaram um estudo sobre desidratação osmótica de ameixa fresca em soluções osmóticas de sacarose e glicose de 50 °Brix a 30 °C em banho ultrassônico, operando a 25 kHz por 30 e 60 min. A perda de água foi mais intensa na solução de glicose com 60 min de sonicação, enquanto o ganho de sólido foi maior para a solução de sacarose com 30 min. Durante a perda de água, canais podem se formar na estrutura do alimento devido à sonicação como fator facilitador a diferença de potencial químico já existente. O ganho de sólidos teve comportamento contrário, onde o maior ganho de sólido foi observado com a solução de sacarose e com menor tempo de sonicação. Isso se justificou pela característica distinta da ameixa como a parede celular fina causando uma resistência à transferência de massa e formando uma camada cristalizada de sacarose.

Corrêa et al. (2017) avaliaram a influência da aplicação de ultrassom no pré-tratamento osmótico do abacaxi. A desidratação osmótica foi realizada com e sem aplicação do ultrassom a 25°C durante 20 e 40 min com solução osmótica de sacarose a 40 %. Foi utilizado um banho ultrassônico com densidade de potência de 55,5 kW/m³ e frequência de 40 kHz. Em relação ao teor de matéria seca, o pré-tratamento de 20 min não apresentou diferença significativa com e sem aplicação de ultrassom. Entretanto, o pré-tratamento sem aplicação de ultrassom a 40 min não apresentou diferença significativa com o pré-tratamento de 20 min com e sem ultrassom. O maior teor de matéria seca foi apresentado durante o pré-tratamento com ultrassom a 40 min. Para o teor de água, não houve diferença significativa entre os pré-tratamentos com e sem ultrassom durante 20 min. O mesmo comportamento foi observado para o pré-tratamento com 40 min. Entretanto, o pré-tratamento com ultrassom de 40 min apresentou menor teor de água, quando comparado aos pré-tratamentos com e sem ultrassom a 20 min.

Kroehnke et al. (2021) avaliaram o impacto do ultrassom por meio de um banho ultrassônico IS-14S produzido pela INTERSONIC (Olsztyn, Polônia) sob frequência de 25 kHz por 120 min. a 308 K durante a desidratação osmótica de kiwi (*Actinidia deliciosa*), utilizando agentes osmóticos convencionais e não convencionais (eritritol, sorbitol e sacarose) em solução aquosa concentradas em 50% (p/p) de soluto. A aplicação assistida de ultrassom resultou em maior perda de água e ganho sólidos, quando comparados aos tratamentos sem ultrassom e sem agitação, sendo os resultados atribuídos principalmente aos efeitos da cavitação. Entretanto, o efeito do

ultrassom se mostrou dependente do tipo de agentes osmóticos, ou seja, cada agente osmótico afetou a transferência de massa de maneira distinta. Neste estudo a solução osmótica de eritritol apresentou maior transferência de massa após 30 min de desidratação osmótica com ultrassom. Além disso, a retenção média de carotenoides e polifenóis para o tratamento com ultrassom foi menor em comparação ao tratamento sem aplicação de ultrassom, provavelmente devido a uma transferência de massa secundária desses compostos. Por outro lado, o uso de sorbitol e eritritol permitiu uma maior retenção dos carotenoides e polifenóis em comparação com o uso de sacarose.

4.4.2. Osmo-secagem

O processo de secagem convencional apresenta algumas dificuldades a serem superadas, como alto gasto energético e longo tempo de processamento (MENON; STOJCESKA; TASSOU, 2020). Com isso, a partir da junção de técnicas de desidratação osmótica e secagem, denominada de osmo-secagem, pode-se obter vantagens de ambos os processos (SAGAR; KUMAR, 2010). A desidratação osmótica prévia permite reduzir a temperatura e o tempo de secagem, minimizando a degradação térmica e melhorando a estabilidade da cor e a intensificação do *flavor* pela incorporação de solutos (RAOULT-WACK et al., 1994). A secagem posterior, propriamente dita, contribui para reduzir ainda mais as taxas das reações degradativas. Ela é ainda responsável por reduzir a massa e o volume do alimento, facilitando seu transporte e armazenamento.

De acordo com Lenart (1996) no processo de osmo-secagem a desidratação osmótica é caracterizada com um pré-tratamento à secagem com o objetivo de reduzir a umidade, sendo que esta redução de umidade do alimento é em torno de 55%, dependendo das condições de processamento, solução osmótica e do alimento. Vale ressaltar, porém, que o processo de osmo-secagem pode obter uma menor taxa de desidratação durante a secagem devido à solução osmótica formar uma barreira de soluto na superfície do alimento.

Cichowska-Bogusz et al. (2020) realizaram a desidratação osmótica de maçã com aplicação de ultrassom por meio de um banho ultrassônico frequência de 21 kHz e potência nominal de 320 W. As soluções osmóticas foram preparadas na concentração de 30% para os polióis (eritritol e xilitol) e de 50% para a sacarose. Maiores tempos de secagem posterior foram apresentados pelo tratamento com a utilização do ultrassom com duração de 2,5 h. para 4 h., no caso de soluções de xilitol e sacarose. Este

comportamento foi justificado pela maior difusão do soluto na matriz do material, dificultando a secagem por convecção. Por outro lado, a difusão do poliol no alimento proporcionou um sabor refrescante aos snacks de maçã, característica desejável aos consumidores.

Li et al. (2021) analisaram o efeito da desidratação osmótica assistida por ultrassom na secagem de ameixa Sanhua (*Prunus salicina* L.). As amostras foram inseridas em um béquer com solução osmótica de sacarose a 20° Brix, o qual foi posicionado no banho ultrassônico em frequência de 40 kHz. A sonicação foi testada em três intensidades 0,45; 0,90 e 1,35 W/g durante 15 min a 30 °C. Após o procedimento com ultrassom, as amostras foram transferidas para outro béquer com solução osmótica de sacarose a 50 °C até que o processo de transferência de massa entrasse em equilíbrio. A secagem posterior foi realizada em um secador a 60 °C. O tratamento com maior intensidade apresentou redução de tempo de secagem de 24% (13 h) quando comparado ao controle (sem ultrassom, 15 h). Mesmo com o ultrassom, o tempo de secagem é considerado longo. Isso se deve a característica de frutas com baixa porosidade e alta densidade. Ainda assim, o ultrassom proporcionou uma taxa de secagem melhorada e difusividade de água efetiva aumentada.

Chandra et al. (2022) investigaram a desidratação osmótica assistida por ultrassom seguida de secagem convectiva de amostras mamão. A desidratação osmótica foi realizada sem e com ultrassom em soluções de sacarose a 25 e 35° Brix durante 10, 15 e 20 min. Foi utilizado um banho ultrassônico (MRC Lab Equipment, Holon, modelo de Israel: DCG-150H de 6 L de capacidade) nas frequências de 33 e 40 kHz a 30 °C. A secagem foi realizada por um secador a 60 °C em uma unidade de secagem desenvolvida em NIFTEM, Índia. O pré-tratamento com frequência de ultrassom de 33 kHz e solução osmótica de 35 °Brix resultou em menor teor de umidade (< 12%, b.u.) e atividade de água (< 0,41). Além disso, o referido processo influenciou positivamente na qualidade nutricional com a capacidade de reter alto teor de fenólicos (88,5 mg GAE/mL), teor de β -caroteno (184,54 mg/g), atividade antioxidante (48,3%) e a preservação da cor. Os mecanismos de cavitação e efeito esponja ocasionado pelo ultrassom e o maior diferencial de potencial químico entre a solução osmótica (35°Brix) e o mamão ocasionaram a intensificação da transferência de massa.

Amanor-Atiemoh et al. (2020) avaliaram pré-tratamentos de osmodesidratação assistida sob secador de vácuo pulsado para fatias de maçã. Os pré-tratamentos avaliados foram: aplicação de ultrassom em água destilada, desidratação osmótica

convencional e assistida por ultrassom. As amostras foram inseridas em soluções de glicose (30% v/w) e, em seguida, posicionadas no banho ultrassônico com frequência de 20 kHz e densidade de potência de 300 W/L por 30 min a 30 ± 1 °C. O sistema de ultrassom era pulsado com intervalo de tempo de 10 s (ligado) e 3 s (desligado). Entre os pré-tratamentos avaliados, a desidratação osmótica com ultrassom se destacou pois melhorou significativamente o tempo de secagem, com redução de 45,46%, e maior taxa de secagem. Relata-se que o efeito esponja possa ter ocasionado a ruptura da estrutura celular, a formação de poros/canais na superfície da célula, diminuição da resistência interna e externa e o aumento da difusividade de transferência de massa.

4.4.2 Secagem

A secagem convectiva é amplamente empregada em alimentos com alto nível de perecibilidade como as frutas e vegetais (HASAN et al., 2019). Fenômenos de transferência de massa e calor atuam simultaneamente para redução da atividade de água (ZHU et al., 2022b), e da atividade microbiana. Como resultado, ocorre a inibição do desenvolvimento de bactérias, bolores e leveduras, e amenização de outros processos de deterioração, como a degradação enzimática e as reações físicas e bioquímicas (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2008).

Devido ao longo tempo de processamento associado, a secagem convectiva vem sendo aprimorada com a complementação da técnica de aplicação do ultrassom. De acordo com Xu et al. (2022) os parâmetros do processo de secagem com aplicação do ultrassom afetam tanto a cinética de secagem quanto a qualidade do produto final. Dentre estas variáveis, estão a temperatura, fluxo de ar, umidade relativa, e os parâmetros acústicos como tempo de sonicação, sonicação de contato ou aéreo, potência, frequência e intensidade. Similarmente como discutido para a desidratação osmótica, a aplicação do ultrassom para intensificação do processo de secagem pode ocorrer de forma assistida ou como pré-tratamento. Os dois métodos serão abordados separadamente.

4.4.2.1. Ultrassom como pré-tratamento à secagem

O ultrassom pode ser empregado por tempos curtos como uma forma de pré-tratar o material, deixando-o mais exposto a remoção de água durante a posterior secagem convectiva. Este método, similarmente ao usado para desidratação osmótica, reduz os custos de processamento e ocasionando resultados relativamente interessantes.

Bai et al. (2023) avaliaram efeitos de diferentes métodos de pré-tratamento, incluindo o próprio ultrassom, na cinética de secagem de fatias de maçã. O pré-tratamento com ultrassom foi realizado em banho ultrassônico nas condições experimentais de 20 kHz, 240 W e 40 °C por 10, 30 e 60 min. As amostras foram inseridas em um béquer com água pura, e em seguida, sonicadas. A etapa de secagem foi realizada em um secador de túnel de ar quente a 60 °C com velocidade do ar de 5 m/s e umidade relativa de 10 %. O pré-tratamento com ultrassom apresentou redução do tempo de secagem de 16,7 % para os tratamentos de 30 e 60 min de sonicação. Já para o pré-tratamento com 10 min de sonicação, não se obteve redução do tempo de secagem. Tempos maiores de pré-tratamento (30 e 60 min) foi o suficiente alterar a estrutura das fatias de maçã, como a abertura dos microporos das células, facilitando a difusão da umidade reduzindo o tempo de secagem.

Cao et al. (2020) avaliaram o pré-tratamento com ultrassom no fruto de lichia para posterior secagem. O pré-tratamento ultrassônico foi realizado em água destilada, a 0 e 25 °C. As ondas ultrassônicas foram emitidas por uma sonda com potência nominal de 750 W e 3 W/g por 10 min. A secagem posterior com ar quente foi realizada a 65°C. O pré-tratamento proporcionou em torno de 50 % da redução do tempo de secagem, onde a secagem sem pré-tratamento foi de 8,5 horas e com pré-tratamento foi de 4-4,5 horas. Atribuiu-se a melhoria à ruptura da microestrutura e estresse de cisalhamento.

Akhoundzadeh Yamchi, Yeganeh, Kouchakzadeh (2022) avaliaram o pré-tratamento ultrassônico em fatias de pêssego na posterior cinética de secagem. As fatias de pêssego foram distribuídas em um banho ultrassônico com água destilada a 30 °C. O banho apresentava frequência de 28 kHz e potência de 70 W. Foram testados três diferentes tempos de sonicação (10, 20 e 60 min). A partir deste pré-tratamento, foi obtido uma redução do tempo de secagem a 65 °C de até 40 %. Quanto maior o tempo de pré-tratamento aplicado com ultrassom, menores foram os tempos de secagem. Este comportamento está associado aos processos de expansão e contração, responsáveis por criar microcanais e, conseqüentemente, uma maior facilidade da perda de umidade.

É reportada também a utilização do ultrassom de potência em conjunto com etanol como tecnologias alternativas para intensificação do processo de secagem. O etanol é considerado como um acelerador devido a sua propriedade de gerar o efeito Marangoni. De acordo com Rojas e Augusto (2018b) o efeito Marangoni é um efeito de transferência de massa devido à diferença de potencial da tensão superficial entre o

etanol e a água. Por ser uma técnica promissora com residuais de etanol desprezíveis no produto final, vem sendo estudada sozinha e juntamente com a aplicação de ultrassom.

Rojas, Silveira e Augusto (2020) analisam pré-tratamentos com ultrassom e etanol para melhorar a secagem convectiva de abóbora. Dentre as condições de processamento, a condição de etanol combinado com ultrassom por 30 minutos obteve resultados mais satisfatórios com reduções de 59 % do tempo de secagem, 44% de consumo de energia e 28 % de melhora das propriedades de reidratação e preservação de ~100 % do teor de carotenoides. A adição do etanol contribuiu, ainda mais, para modificações nas paredes celulares, mas também para variações na pressão de vapor da água e o efeito Marangoni.

Santos et al. (2021) também avaliaram a influência do pré-tratamento com etanol e ultrassom na cinética de secagem de fatias de cenoura. O ultrassom foi aplicado em um banho ultrassônico com frequência de 25 kHz por 30 min sob temperatura de 20°C, e potência volumétrica real de 23,9 e 25,7 W/L para água e o etanol, respectivamente. A desidratação com etanol e com etanol assistido por ultrassom apresentaram uma redução em torno de 50% do tempo da cinética de secagem em relação à amostra controle que não passou por nenhum pré-tratamento antes da secagem. Para avaliar o efeito do ultrassom, foi analisado o processo de sonicação em água. Com essa condição teve o ganho de água na amostra, evidenciado nas análises de textura, microscopia e taxa de encolhimento. Mesmo com uma umidade 38% maior que a amostra controle *in natura* foi obtido menores tempos de secagem. Isso mostra que o ultrassom, por si só, proporciona mecanismos que ajudam a desobstruir os poros naturais das amostras para facilitar a secagem.

Outros alimentos como batata yacon (MARTINS et al., 2022), morango (SANTOS et al., 2022), batata (ROJAS; AUGUSTO, 2018a) e maçã (ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020) também apresentaram resultados satisfatórios com a combinação de etanol e ultrassom.

4.4.2.2. Ultrassom como tecnologia assistente à secagem

De acordo com Huang et al. (2020) o auxílio do ultrassom durante a secagem pode possibilitar a utilização de temperaturas inferiores, ou seja, algo desejável no processo de secagem de alimentos termosensíveis como frutas e vegetais. Do mesmo modo que a aplicação de ultrassom no meio líquido é capaz de ocasionar alterações no meio, o ultrassom transportado por via aérea também gera microfluxos de ar na

interface sólido-gás, variação de pressão e velocidade, efeito esponja e cavitação (FAN; ZHANG; MUJUMDAR, 2017). Estes efeitos, associados aos mecanismos de remoção de água na secagem convectiva, possibilitam o emprego de condições mais brandas de processo e com menor tempo de exposição do produto ao meio de contato.

A aplicação de ultrassom durante a secagem pode ser realizada por dois modos principais: ultrassom sem contato/por via aérea e de contato. No primeiro caso, as ondas são transmitidas através do ar de secagem até atingir o alimento. No segundo método, a sonda é incorporada como um dispositivo ao secador para entrar em contato diretamente com o alimento a ser seco. Resultados diferentes são atingidos de acordo com o método utilizado, devido às diferenças nas propriedades de transporte das ondas ultrassônicas até o alimento. Algumas vantagens que são apresentadas na aplicação do ultrassom de contato, estando entre elas a ausência de atenuação da energia acústica, ausência de problemas incompatibilidade de impedância (CAO et al., 2019; TAO et al., 2021) e menor perda de energia para atingir o alimento (SCHÖSSLER; JÄGER; KNORR, 2012).

Tao et al. (2018) estudaram a secagem convectiva combinada com ultrassom de contato em fatias de alho. As fatias eram dispersas em uma placa de aço no qual foi posicionada na ponta do transdutor de modo que a energia acústica era transmitida a placa. A secagem foi realizada nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e intensidades de ultrassom 216,8, 902,7 e 1513,5 W/m². Na maior intensidade, foi obtida uma redução do tempo de secagem de 35,0 %, 48,5 % e 50,0 % para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente. Além da redução do tempo de processamento, o ultrassom proporcionou menores alterações nas propriedades de qualidade como cor e retenção dos compostos organossulfurados.

Magalhães et al. (2017) realizaram pré-tratamento e secagem com aplicação de ultrassom em cubos de maçãs utilizando potências de 75 e 160 W. Em ambos os processos, o pré-tratamento e a secagem com aplicação do ultrassom apresentaram efeitos positivos, aumentando a transferência de massa externa em até 30%, redução do tempo de secagem em 58% e um aumento de difusividade efetiva de 93%. De acordo com Fan, Zhang e Mujumdar (2017) esse comportamento benéfico durante a secagem é devido à cavitação no interior da matriz sólida e o efeito esponja, ocasionando a remoção da umidade no interior da amostra e reduzindo a camada limite da difusão, respectivamente.

Tao et al. (2021) compararam a aplicação de ultrassom por via aérea e de contato na secagem de amoras. O aparato experimental continha um secador e uma sonda ultrassônica acoplada que, de acordo com o posicionamento da sonda, era definido como ultrassom de contato ou via aérea. O ultrassom apresentava frequência de 20 kHz e intensidade real calculada de $180,1 \text{ W/dm}^2$. A secagem foi realizada a 65°C com velocidade do ar de 2,0 m/s. A redução do teor de umidade até 1 g água/g matéria seca foi mais rápida com a aplicação de ultrassom de contato quando comparado ao aéreo, sendo esta diferença de aproximadamente 55 min. Este comportamento foi justificado pela possibilidade de evitar a atenuação da energia acústica pelo ar e incompatibilidade de impedância acústica. Além disso, o ultrassom de contato proporcionou a redução de 27% de consumo de energia e de maneira geral uma maior qualidade ao produto como maior retenção dos compostos bioativos, como antocianinas e ácidos orgânicos. Embora alguns trabalhos reportem uma melhor eficiência do ultrassom de contato, a área de emissão deve ser de tamanho suficiente para entrar em contato com toda a amostra. Maiores quantidades de amostra requerem emissores maiores e, portanto, envolve maior gasto.

Além das opções de secagem com ultrassom via aérea e de contato está sendo estudada a secagem a partir da combinação de vácuo e ultrassom. Da Silva Junior (2018) realizaram a secagem de mamão utilizando a combinação de ultrassom e vácuo. O aparato experimental continha um recipiente para inserir as amostras, conectado a uma bomba de vácuo em que era posicionado no interior do banho ultrassônico com temperatura controlada a 60°C . Foram realizados diversos experimentos para avaliar a influência do ultrassom, do vácuo e de ambos. O vácuo foi mantido entre 0,02 e 0,03 MPa e a sonicação ocorreu através de um banho ultrassônico de 25 kHz e a intensidade de 4870 W/m^2 . O mamão seco usando ultrassom e vácuo apresentou o menor tempo de processamento, exigindo 270 minutos para atingir a condição de equilíbrio, enquanto o mamão seco sem ultrassom e vácuo (secagem controle) exigiu 450 min. Além disso, este tratamento apresentou a menor perda de ácido ascórbico (41,3%), enquanto a secagem somente com ultrassom apresentou menor perda de carotenoide (9,7%) quando comparados com a secagem controle. Os autores concluíram que o tratamento ultrassônico acelerou o processo de secagem a vácuo para o mamão e minimizou a perda dos compostos bioativos estudados.

Souza da Silva et al. (2019) avaliaram a secagem de nectarina a partir da combinação de vácuo e ultrassom nas mesmas condições experimentais de Da Silva

Junior (2018). Para a condição de processamento com vácuo e ultrassom, foi apresentada uma redução de tempo de secagem em torno de 50%, aumento da taxa de cinética de secagem e do coeficiente de difusividade, quando comparado ao processamento controle (sem ultrassom e vácuo). Os autores relataram que os resultados obtidos pelo uso do método combinado estão diretamente associados à redução da camada limite pela alteração das resistências externas durante a sonicação devido a microvibração, variações de pressão e viscosidade, além do efeito esponja produzido diretamente na matriz. Ao utilizar somente o ultrassom, foi obtido melhor retenção de compostos fenólicos na nectarina desidratada quando comparado com o tratamento empregado somente o vácuo.

4.5. Influência do ultrassom nas propriedades de qualidade

4.5.1 Cor instrumental

A cor é um parâmetro importante e que influencia diretamente na decisão do consumidor no momento da compra (NOWACKA et al., 2017). Ela está relacionada à presença de pigmentos como carotenoides, clorofilas, antocianinas, e depende de fatores como: cultivar (HUA et al., 2018), sistemas de cultivo (PERTUZATTI et al., 2015), safra (KWIATKOWSKI et al., 2020), variação geográfica (SUN et al., 2021), processamento (LI et al., 2020) e embalagem (NIMITKEATKAI et al., 2022). Cores vibrantes e homogêneas levam os consumidores a ter uma maior aceitabilidade. Por esse motivo, é fundamental que a indústria de alimentos compreenda e amenize o impacto de tecnologias empregadas durante o processamento de frutas e vegetais. Ainda mais desafiador, é reduzir os impactos decorrentes do uso de técnicas não convencionais e emergentes como o ultrassom durante o processamento. Nesse sentido, o presente trabalho revisitou a literatura para trazer alguns estudos que avaliaram o comportamento da cor instrumental (espaço de cor CIEL*a*b*) em frutas e vegetais submetidos ao tratamento por ultrassom para intensificação do processo de desidratação.

Nowacka e Wedzik (2016), por exemplo, aplicaram ultrassom como pré-tratamento a secagem de fatias de cenoura fresca. As amostras foram embaladas a vácuo com o objetivo de evitar a perda de compostos durante a aplicação do ultrassom. O tempo de aplicação do ultrassom foi o principal fator relacionado às alterações na cor, quando comparado à frequência (21 e 35 kHz) do banho ultrassônico. As amostras tratadas por 10 e 20 minutos tiveram alterações leves na coloração. Entretanto, ao estender o tratamento para 30 min, diferenças significativas, independentemente da

frequência de ultrassom, resultaram no escurecimento da cor da cenoura em comparação com a cenoura crua. Além disso, o processo de secagem influenciou significativamente as mudanças de cor da cenoura. Após a secagem, as amostras tratadas com ultrassom por 20 ou 30 min apresentaram melhor retenção de cor quando comparadas às amostras não tratadas ou pré-tratada por 10 minutos - contribuindo, assim, para uma melhor preservação da cor nas amostras secas.

KONOPACKA et al. (2017) realizaram aplicação de ultrassom através de um banho ultrassônico (25kHz) por 20 minutos em fatias de cenoura. Os autores observaram uma maior retenção de carotenoides, em especial o β -caroteno, após a sonicação, fato que foi associado a agregação dos carotenoides – inibindo sua degradação durante a secagem.

Processos de desidratação osmótica e secagem assistido por ultrassom de fatias de kiwi usando três diferentes agentes osmóticos – eritritol, sorbitol e sacarose foram estudados por Kroehnke et al., (2021). A desidratação osmótica assistida por ultrassom resultou em uma intensificação nos processos de transferência de massa, além de apresentar menor perda de cor após a secagem convectiva, quando comparada a secagem assistida por ultrassom. Entretanto, o uso de secagem convectiva assistida por ultrassom levou a uma maior degradação de cor em comparação com amostras secas usando secagem convectiva, exceto para amostras tratadas com eritritol. A clorofila, pigmento responsável pela coloração do kiwi, pode se difundir mais intensificamente através da membrana semipermeável devido aos efeitos do ultrassom.

Önal et al. (2021) avaliaram o efeito da temperatura de secagem de pêra “Rocha” submetidas a pré-tratamentos de micro-ondas e ultrassom. O pré-tratamento com ultrassom foi realizado em um banho ultrassônico com 35 kHz de frequência e 160 W de potência nominal por 10 min a 30°C. As amostras foram embaladas a vácuo antes de serem inseridas no banho com o objetivo de evitar efeitos adversos de lixiviação de substâncias contidas nos frutos. O procedimento com pré-tratamento ultrassônico e secagem a 60 °C apresentou eficiência satisfatória, com condições favoráveis para controlar ou inibir as reações de escurecimento, além de atingir a cor desejável. Ainda, foi obtido menores variações de cor ΔE , parâmetro crucial para frutas e vegetais secos que atua como indicador da capacidade do olho humano de diferenciação.

O parâmetro cor depende das condições experimentais da osmótica, do ultrassom e da secagem podendo apresentar uma melhor retenção ou não. De acordo com Llavata et al. (2020), a redução do tempo de secagem proporcionado pelo pré-

tratamento osmótico assistido por ultrassom pode favorecer a preservação da cor devido a absorção do soluto e liberação de gases do alimento. Comportamento contrário pode ocorrer devido ao mecanismo de cavitação, causador a aceleração das reações químicas (YAMCHI, YEGANEH E KOUCHAKZADEH, 2022) com a liberação de radicais livres.

Kowalski, Mierzwa, Stasiak (2017) comparou os processos de secagem de maçã convencional com a secagem convectiva assistida por ultrassom. Os autores relataram que a aplicação de ultrassom causou uma maior alteração da cor, possivelmente justificado pela atomização da água da superfície do alimento. A camada de umidade fragmentada é exposta a recepção das ondas ultrassônicas e, conseqüentemente, promove maiores temperaturas na superfície - favorecendo a alteração da cor. Spinei e Oroian (2021) apresentam mudança significativa no parâmetro da luminosidade (L^*) e na cor total entre as amostras frescas e tratadas osmoticamente com aplicação de ultrassom em mirtilos. Comportamentos distintos foram apresentados para o parâmetro luminosidade (L^*), onde menores valores foram observados para os tratamentos convencionais e maiores valores para os tratamentos com aplicação de ultrassom. A solução osmótica, por si só, causa uma redução da luminosidade da fruta. Por outro lado, o aumento da luminosidade com a presença do ultrassom pode ter ocorrido devido ao efeito de cavitação, esponja e lixiviação das antocianinas, responsáveis pela pigmentação escura dos mirtilos.

Em geral, o ultrassom possui um efeito de extração dos pigmentos dos alimentos quando aplicado durante o processo de desidratação osmótica. Contrariamente, a incorporação de determinados solutos pode proteger contra a ação de agentes externos. Já durante a secagem, a cavitação da camada de água superficial causada pela sonicação pode acarretar na degradação dos compostos que conferem cor ao alimento. Por outro lado, outras técnicas vêm sendo empregadas para associar a redução no tempo de secagem com a retenção da coloração.

Dentre essas técnicas, pode-se destacar o uso de ultrassom para acelerar o processo de secagem a baixa temperatura ($<10\text{ }^{\circ}\text{C}$) sob pressão atmosférica. Este processo é denominado de liofilização a pressão atmosférica, caracterizada pela secagem convectiva com corrente de ar frio seco para remoção de água em temperaturas amenas. Seu emprego é propício para obter uma desidratação efetiva de produtos com compostos termolábeis sem prejudicar suas qualidades. Uma desvantagem é o tempo prolongado devido a transferência de massa no interior da camada seca controlando a

taxa. Com isso, o ultrassom é incorporado para intensificar as taxas de transferência de calor e massa, sem abrupto aumento de temperatura preservando o estado da água congelada. Isso melhora as propriedades físico-químicas e sensoriais, reduz o tempo de processo, custo energético e os níveis de exposição ao oxigênio para retardar a deterioração (COLUCCI et al., 2018; WAGHMARE et al., 2023).

Colucci et al. (2018) avaliaram a liofilização atmosférica assistida por ultrassom nas propriedades antioxidantes da berinjela. O aparato experimental era composto por um transdutor piezoelétrico em que as ondas ultrassônicas eram dissipadas pela parede da câmara cilíndrica de secagem. O fluxo de ar era produzido por um ventilador e a baixa temperatura era mantida devido ao uso de solução glicol-água (45 % v/v) no trocador de calor. As condições experimentais foram temperaturas de -5 , $-7,5$ e -10 °C, potência ultrassônica de 0, 25 e 50 W com frequência de 21,9 kHz, velocidades do ar de 2, 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e diferentes tamanhos de amostra (lado do cubo de 8,8 mm e 17,6 mm). Resultados relevantes foram apresentados com o uso do ultrassom, tais como a melhora na transferência de massa e redução do tempo de secagem sem afetar significativamente o teor de antioxidantes da berinjela. A melhora da transferência de massa é atribuída a microagitação na interface sólido-fluido, a qual favorece a redução da resistência externa à transferência de massa, e pelo efeito esponja, com a criação de microcanais que facilitam a migração da água.

Fan et al. (2020) avaliaram o efeito do pré-tratamento ultrassônico nas propriedades de fatias de cenoura liofilizadas por tecnologias de liofilização. O pré-tratamento ultrassônico foi realizado em um processador ultrassônico com água destilada a 25°C por 30 min. nas intensidades de 0,31, 0,50, 0,63 W/cm^2 e potência de 150, 240 e 300 W. Em seguida as amostras passaram por um branqueamento por 2 min. O parâmetro cor foi analisado a partir dos parâmetros L^* , a^* e b^* . Os parâmetros L^* e a^* não apresentaram diferença significativas ($p > 0,05$) entre as amostras pré-tratadas com ultrassom a 240W e as amostras sem pré-tratamento ultrassônico e branqueamento, apenas liofilizadas. Entretanto, houve a redução do parâmetro b^* com aplicação do ultrassom.

Prosapio e Norton (2018) realizaram aplicação simultânea de ultrassom e agentes de firmeza na desidratação osmótica seguida de liofilização. A condição experimental utilizou soluções osmóticas de frutose a 50 °Brix e 1% (p/p) de agente firmador lactato de cálcio, aplicação de ultrassom (banho ultrassônico, 40 kHz e 130 W) a 50 °C. O processo proposto apresentou o parâmetro ΔE com valor ($\sim 13,00$) mais

próximo da amostra apenas liofilizada, sem pré-tratamento ultrassônico - resultado desejável para os consumidores.

A condição de vácuo durante a liofilização é bastante utilizada devido a resultados satisfatórios obtidos em relação a retenção de cor, porém apresenta desvantagem por ser considerada uma técnica de alto custo e longo tempo de processamento. Chu et al. (2021) avaliaram a aplicação de ultrassom durante a desidratação osmótica para acelerar a transferência de massa e melhorar as propriedades de qualidade de fatias de pêssego amarelo liofilizado (*Amygdalus persica*). O pré-tratamento osmótico com ultrassom foi realizado com solução de trealose (40%, p/v) com lactobionato de cálcio (1%, p/v) por 15 min a 20 ± 5 °C. As ondas ultrassônicas foram emitidas a partir de uma sonda com diferentes frequências (20 kHz, 28 kHz, 40 kHz) e potências (0, 180, 240 e 300 W). A liofilização a vácuo foi realizada por 48 h. A variação total de cor foi inferior para as amostras liofilizadas com aplicação de ultrassom ($\Delta E \leq 13,58$) quando comparadas às amostras pré-tratadas com a solução osmótica ($\Delta E \leq 16,84$) e com as amostras apenas liofilizadas ($\Delta E \leq 23,29$). De acordo com Waghmare et al. (2023), a retenção da cor com aplicação do ultrassom é devido a redução do tempo de secagem, que acaba por inibir a degradação do pigmento, inativação das enzimas polifenol oxidase e peroxidase que degradam a cor, e pela lixiviação de pigmentos dos vacúolos, proporcionando uma coloração mais viva e uniforme.

A utilização de ultrassom em pré-tratamentos para posterior liofilização atmosférica ou a vácuo mostrou-se positiva quando analisado o parâmetro cor para diversos vegetais, como o morango (ZHANG et al., 2020), quiabo (XU et al., 2021), marmelo (YILDIZ; IZLI, 2019) e cenoura (RAWSON et al., 2011).

4.5.2 Textura

A textura é uma característica importante de frutas e vegetais desidratados, determinada principalmente pela composição e estrutura da matriz de parede celular (JACKMAN; STANLEY, 1995). Ela impacta diretamente na aceitabilidade do produto e é dependente das condições de processos, seja na desidratação osmótica e/ou secagem (ASLAM et al., 2021; JIANG et al., 2021; PANDISELVAM et al., 2021).

Ramya e Jain (2017) relatam que vegetais e frutas, ou ainda alimentos a base dos mesmos, apresentam maior susceptibilidade a estresses mecânicos. Em processos de desidratação osmótica, alterações estruturais podem estar relacionadas ao tipo de agente

osmótico, concentração e temperatura e processo. Quanto a secagem, muito está atribuído à temperatura do ar de secagem, tempo de exposição e presença de algum agente acelerador.

Além disso, técnicas de processamento não-convencionais coadjuvantes à desidratação osmótica e/ou secagem podem causar transformações físicas e químicas na matriz. Este é o caso dos processos submetidos à aplicação de ultrassom (KROEHNKE et al., 2021; PANDISELVAM et al., 2021; RAHAMAN et al., 2019; ZHU et al., 2022a). Em consequência da sonicação, os mecanismos de microagitação, cavitação e aquecimento resultam em modificações de textura que podem ser desejáveis ou indesejáveis.

Quando aplicado ultrassom na desidratação osmótica de ameixa em soluções osmóticas de sacarose e glicose, alterações na textura foram evidenciadas no produto final. Maior aceitabilidade dos consumidores, visando produtos mais macios, é passível de ser obtida ao usar soluções osmóticas de glicose com 30 e 60 minutos de aplicação de ultrassom. Estas condições reduziram a dureza das ameixas, evidenciado por uma diminuição da mastigabilidade. Comportamento contrário foi observado para a solução de sacarose, possivelmente devido à aderência da sacarose na superfície dos cubos de ameixa (RAHAMAN et al., 2019).

Osae et al. (2019) relataram que a aplicação de ultrassom em fatias de gengibre imersas em solução de sacarose a 20% (w/w) apresentou menor firmeza no material do que as amostras controle, sem a aplicação de ultrassom e com aplicação de ultrassom em água. Devido à cavitação, ocorre a formação de microcanais e redução da pressão de turgescência, aumento da permeabilização celular e da característica porosa do alimento. O mesmo comportamento foi relatado por Hamedi et al. (2018) para a desidratação osmótica de géis-modelo de ágar com extrato de compostos fenólicos de casca de romã.

Processos de secagem em produtos de origem vegetal podem ocasionar maior maciez pela quebra da pectina. Isso se deve ao aumento da atividade da enzima pectinase em decorrência dos danos causados na membrana celular (PANDISELVAM et al., 2021; TORREGGIANI; BERTOLO, 2019). Por outro lado, é natural que o produto seco apresente maior dureza do que o produto fresco, com maior umidade. A aplicação do ultrassom surge como uma alternativa para obter um processo de secagem mais brando e eficiente capaz de gerar benefícios à qualidade do alimento, principalmente no que diz respeito a melhor textura (KAHRAMAN et al., 2021).

Kahraman et al. (2021) avaliaram a secagem de maçã por contato ultrassônico não térmico. As amostras secas com ar quente apresentaram maior dureza (20,44 N) quando comparada com as amostras secas por contato ultrassônico (16,86 N). Esta maior dureza está relacionada com o fenômeno de endurecimento, causado pela formação de uma estrutura relativamente firme e dura.

Chen et al. (2020) avaliaram o efeito da secagem a vácuo assistida por ultrassom para desidratar fatias de alho. O aparato experimental era composto por um recipiente contendo as amostras, acoplado a uma bomba a vácuo e posicionado no banho ultrassônico. Quatro tipos de processamentos foram realizados: secagem a vácuo assistida por ultrassom, secagem a vácuo, secagem assistida por ultrassom e secagem por convecção. Maior dureza foi observada em todos os processamentos quando comparados com as fatias de alho frescas. Este comportamento pôde ser associado a perda de água, proporcionando tensão e encolhimento das amostras. As amostras do processo utilizando ultrassom, especificamente, apresentaram valor inferior de dureza quando comparado aos respectivos tratamentos convencionais. O ultrassom reduz a força de ruptura das amostras devido a formação de microcanais e erosão das paredes celulares, proporcionando menor dureza.

Szadzińska et al. (2020) realizaram secagem híbrida (ultrassom + micro-ondas + secagem convectiva) de beterraba vermelha. As ondas acústicas produzidas pelo ultrassom eram transportadas pelo ar de secagem no interior da câmara, com frequência de 26 kHz e potência nominal máxima de 200 W. A secagem convectiva se deu de forma contínua, com aplicação de 3 min de microondas seguido de 30 min de ultrassom, ambos no início da secagem. Este tratamento resultou em amostras mais frágeis, ou seja, de menor dureza (92,3 N). Efeito *puffing* e a presença de poros podem ser os causadores da redução da resistência do produto.

4.5.3 Propriedades antioxidantes

As propriedades antioxidantes, parâmetros de extrema importância para a saúde humana e qualidade do alimento, são encontrados nas frutas e vegetais em diferentes níveis. Estes níveis são dependentes do próprio produto, mas, principalmente, do seu processamento. Nesse sentido, estudos devem ser realizados para a preservação desses compostos durante o processamento. Esse estudo é fortemente encorajado durante a secagem, processo no qual o produto é submetido a altas temperaturas e longos tempos de exposição a uma corrente de ar. A retenção dos compostos bioativos irá garantir uma

maior estabilidade durante o armazenamento em longos períodos, mesmo que sob baixas atividades de água. Os principais componentes antioxidantes determinados em frutas e vegetais após processo de desidratação são a vitamina C e compostos fenólicos. A vitamina E também é um composto antioxidante importante, porém é escasso em pesquisas (XU et al., 2022).

A retenção de vitamina C em produtos desidratados é almejável, sendo parâmetro de qualidade utilizado nos estudos para determinação de condições ótimas de processamento. Isso se deve à sua propriedade termoinstável, passível de ser afetada por outras condições de processamento, como presença de luz e teor de oxigênio (ERCAN; SOYSAL, 2013).

A aplicação de ultrassom no processo de desidratação osmótica tem se destacado por promover a redução do consumo de energia, tempo de processamento e custo, mas sobretudo na preservação de propriedades antioxidantes e dos compostos bioativos (OSAE et al., 2019).

Infante et al. (2021) relataram que não houve diferença significativa nas propriedades antioxidantes entre a amostra pré-tratada com ultrassom e a controle de batata-doce Beauregard durante a secagem a 70°C. Em outras palavras, os compostos antioxidantes que atuam via mecanismo de captura de radicais livres foram preservados, mesmo usando ultrassom para redução do tempo de processo.

Fatias de kiwi foram desidratadas osmoticamente com e sem aplicação do ultrassom em soluções de sacarose, eritritol e sorbitol. Na etapa de desidratação osmótica os compostos bioativos, carotenoides e polifenóis apresentaram uma retenção média de 10% e 19%, respectivamente, menor do que o processamento sem ultrassom. A secagem convectiva com ultrassom utilizando os edulcorantes proporcionou o aumento da retenção dos carotenoides e polifenóis. Houve uma retenção de carotenoides de 51% com ultrassom e 38% sem ultrassom, além de uma retenção média dos polifenóis de 82% com ultrassom e 66% sem ultrassom (KROEHNKE et al., 2021). Em processos de desidratação osmótica, deve-se avaliar cada material especificamente. Devic et al. (2010) justifica que os compostos fenólicos que são influenciáveis pela estrutura da matéria prima, agente osmótico e temperatura de processamento podem estar mais ou menos susceptíveis à degradação.

Ma et al. (2021) estudaram o efeito do ultrassom nos compostos fenólicos durante a desidratação osmótica de cubos de maçã em solução osmótica de sacarose, ao aplicar ultrassom com frequência fixa de 40 ou 80 kHz e de frequência dupla 40+80

kHz em banho ultrassônico. Maior retenção dos compostos fenólicos e da atividade antioxidante foi apresentada nos experimentos com frequência dupla, podendo ser justificado à intensa cavitação capaz de remover as moléculas de oxigênio da solução e seu potencial de degradação dos compostos fenólicos. Aumentando a intensidade, frequência e tempo de processamento ocasionaram uma aceleração na degradação e a isomerização da epicatequina e catequina devido à presença de radicais hidroxilas gerados pela cavitação. Existem duas situações durante a aplicação do ultrassom que geram a formação dos radicais livres: a) devido ao aumento da temperatura no interior das bolhas de cavitação; e b) devido à redução do raio das bolhas de cavitação que causam uma maior propagação dos radicais livres em direção à superfície das bolhas, aumentando a sua interação com os compostos fenólicos.

Sakoei-Vayghan et al. (2020) avaliaram os efeitos da desidratação osmótica, com e sem sonicação, e pré-tratamentos de revestimento à base de pectina nas propriedades funcionais de damasco posteriormente secos sob ar quente. Experimentos com aplicação do ultrassom apresentaram maior capacidade antioxidante e teor de β -caroteno em decorrência do menor tempo de processamento, uma vez que a formação de microcanais gerado pela cavitação facilita a saída da água e reduz o tempo de exposição da amostra às temperaturas elevadas de secagem. Contudo, também houve uma perda de compostos fenólicos totais (TPC) e vitamina C. A frequência do ultrassom foi um fator determinante, onde maiores frequências apresentaram menores teores de compostos fenólicos totais e β -caroteno.

4.5.4 Estudos sensoriais

Saber a aceitabilidade do produto pelo consumidor é crucial no desenvolvimento de novos produtos ou produtos submetidos a novas tecnologias. Sabor, odor, flavor, aparência e mastigabilidade são os fatores de destaque em uma análise sensorial. Produtos com aplicação de ultrassom em alguma etapa de processo de desidratação vêm sendo bastante estudado, porém a avaliação sensorial de frutas e vegetais ainda é escassa. A maioria dos estudos encontrados é referente a produtos cárneos e bebidas (AKDENIZ; AKALIN, 2023; BARRETTO et al., 2020; CARRILLO-LOPEZ et al., 2021; SHEN et al., 2021).

Konopacka et al. (2017) apresentaram resultados satisfatórios na percepção sensorial de chips de cenoura pré-tratados com ultrassom e tratados enzimaticamente, principalmente relacionados a coloração. Além disso, o efeito positivo na retenção dos

carotenoides pode ser a razão associada à retenção da coloração e melhor aceitação sensorial.

Dias da Silva et al. (2016) realizaram um estudo de pré-tratamentos com ultrassom e vácuo para secagem de melão. Foram testados quatro pré-tratamentos, controle (sem aplicação de ultrassom e vácuo), com ultrassom, a vácuo e o combinado de ultrassom e vácuo. A análise sensorial do produto final, submetida ao pré-tratamento com ultrassom e vácuo, apresentou maior retenção de carotenoides totais e pouco afetada na cor. O painel sensorial desta condição avaliou os atributos aparência, aroma, sabor e textura por meio de escala hedônica. As amostras apresentaram valores superiores a amostra controle (sem pré-tratamento) para os atributos aparência, aroma e sabor. Especificamente para atributo textura, houve comportamento inverso quando comparado com as amostras controle. Mesmo com valores distintos em cada atributo, as amostras não apresentaram diferença significativa entre os dois tratamentos – condição desejável juntamente com a redução de tempo de secagem, menor perda total de carotenoides, textura mais suave e melhor preservação da cor.

Zhang et al. (2021) avaliaram a influência de pré-tratamentos com ultrassom, ultra-alta pressão (UHP) e ambas as técnicas na qualidade sensorial de fatias de morango liofilizadas. O painel sensorial de avaliadores analisou os atributos aparência, aroma textura e gosto com escala hedônica. Em todos os atributos os morangos liofilizados com pré-tratamentos tiveram boas características sensoriais com notas superiores quando comparado com o morango sem pré-tratamento. Este comportamento está associado à presença de antocianinas que proporcionam a cor desejada “avermelhada”. A redução do teor de oxigênio na amostra a partir de movimentos de compressão e expansão mecânica inibe a decomposição da antocianina pelos mecanismos de oxidação. Além disso, as amostras pré-tratadas apresentaram melhor crocância, a qual pode ser justificada pela redução de umidade associada à quebra da parede celular durante o pré-tratamento.

4.6. Conclusão

A presente revisão mostra que o ultrassom é uma tecnologia emergente não térmica que está sendo amplamente empregada como pré-tratamento ou de forma assistida nos mais diferentes processos de desidratação de frutas e vegetais. Resultados satisfatórios são exibidos principalmente em relação a intensificação da transferência de massa devido aos mecanismos de cavitação e efeito esponja, minimizando a resistência

externa e facilitando o fluxo mássico. De forma secundária, um processo intensificado reduz o tempo de exposição do vegetal às altas temperaturas e oxigênio – promovendo, então, melhor conservação dos parâmetros de qualidade e das propriedades bioativas.

Na desidratação osmótica o ultrassom pode melhorar a aderência do soluto à matriz, obtendo um alimento com sabor acentuado. O modo de aplicação e os parâmetros operacionais (tempo de sonicação, frequência e potência) influenciam fortemente na forma e intensidade com que as características únicas de cada alimento e, principalmente, a microestrutura são afetadas. A intensificação da secagem pelo ultrassom facilita a formação de microcanais e acelera a migração da umidade encontrada no centro do produto à superfície do produto. Com isso, tem-se um aumento da porosidade do alimento e uma melhora de sua percepção de textura. Além disso, existe a redução no tempo de exposição a alta temperatura e melhora na retenção dos compostos bioativos. De acordo com o processo e produto final almejado, o ultrassom pode ser utilizado como coadjuvante nas etapas combinadas de osmo-secagem para reduzir ainda mais os efeitos térmicos e oxidativos que o alimento está exposto.

Com a variabilidade de dados na literatura, devem ser avaliadas as condições mais adequadas para cada matriz alimentícia e cada processo de modo que existe uma melhora, não somente nos parâmetros de cinética, mas principalmente nos aspectos de qualidade, pois ainda que haja uma tendência no estudo de processos auxiliados pelo ultrassom, o estudo de seu efeito nos parâmetros de qualidade como cor, textura, propriedade antioxidante e percepção sensorial são escassos.

4.7. Referências Bibliográficas

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

AKDENIZ, V.; AKALIN, A. S. Power ultrasound affects physicochemical, rheological and sensory characteristics of probiotic yoghurts. *International Dairy Journal*, v. 137, p. 105530, 2023.

AKHOUNDZADEH YAMCHI, A.; YEGANEH, R.; KOUCHAKZADEH, A. Effect of ultrasonic pretreatment on drying kinetics and physio-mechanical characteristics of peach slices. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 8, p. e14053, 2022.

AMANOR-ATIEMOH, R. et al. Acoustically-aided osmo-dehydration pretreatments under pulsed vacuum dryer for apple slices: drying kinetics, thermodynamics, and quality attributes. **Journal of Food Science**, v. 85, n. 11, p. 3909–3919, 2020.

ARAYA-FARIAS, M.; RATTI, C. Dehydration of foods: General concepts. **Advances in Food Dehydration**, p. 1–36, 2008.

ASLAM, R. et al. Understanding the effects of ultrasound processing on texture and rheological properties of food. **Journal of Texture Studies**, 2021.

AWAD, T. S. et al. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. **Food Research International**, 2012.

AWUCHI, C. G.; ECHETA, C. K. Current developments in sugar alcohols: chemistry, nutrition, and health concerns of sorbitol, xylitol, glycerol, arabitol, inositol, maltitol, and lactitol. **International Journal of Advanced Academic Research**, v. 5, n. 11, p. 1–33, 2019.

AZOUBEL et al. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 194-198, 2010.

BAI, J. W. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 83, p. 103216, 2023.

BARRETTO, T. L. et al. Impact of ultrasound and potassium chloride on the physicochemical and sensory properties in low sodium restructured cooked ham. **Meat Science**, v. 165, p. 108130, 2020.

BERLAN, J.; MASON, T. J. Dosimetry for power ultrasound and sonochemistry. In MASON T. J. (Ed.). **Advances in sonochemistry**. London: JAI Press Inc, 1996. v. 4, p. 1–73.

BIALIK, M. et al. The influence of osmotic dehydration conditions on drying kinetics and total carotenoid content of kiwiberry (*Actinidia Arguta*). **International Journal of Food Engineering**, v. 16, n. 1–2, 2020.

BOZKIR, H. et al. Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 54, p. 135–141, 2019.

BROMBERGER SOQUETTA, M. et al. Effects of pretreatment ultrasound bath and ultrasonic probe, in osmotic dehydration, in the kinetics of oven drying and the physicochemical properties of beet snacks. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 1, p. e13393, 2018.

ÇAĞLAYAN, D.; BARUTÇU MAZI, I. Effects of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment and finish drying methods on the quality of pumpkin slices. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 9, p. e13679, 2018.

CAO, X. et al. Drying kinetics, antioxidants, and physicochemical properties of litchi fruits by ultrasound-assisted hot air-drying. **Journal of Food Biochemistry**, v. 44, n. 1, p. e13073, 2020.

CAO, Y. et al. Effect of microwave and air-borne ultrasound-assisted air drying on drying kinetics and phytochemical properties of broccoli floret. **Drying technology**, v. 38, n. 13, p. 1733–1748, 2019.

CAPOTE, F. P.; CASTRO, M. D. L. **Analytical Applications of Ultrasound**. Elsevier, v. 26, p. 1–34, 2006.

CARCEL CARRIÓN, J. A. **Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia**. España: Universitat Politècnica de València, 2003.

CÁRCEL, J. A. et al. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p.200–207, 2012.

CÁRCEL, J. A. et al. High intensity ultrasound effects on meat brining. **Meat Science**, v. 76, n. 4, p. 611–619, 2007.

CARCEL, J. A. et al. Influence of temperature and ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of red pepper. **Drying Technology**, v. 37, n. 4, p. 486–493, 2019.

CARLIN, B. **Ultrasonica**. Bilbao: Urmo, 1972.

CARRILLO-LOPEZ, L. M. et al. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, p. 105467, 2021.

CHANDRA, A. et al. Ultrasound-assisted osmotic dehydration, followed by convective drying of papaya: effect on physicochemical and functional quality parameters. **Systems Microbiology and Biomanufacturing**, v. 1, p. 1–12, 2022.

CHEE, C. Y. K.; TONG, L.; STEVEN, G. P. A Review on the Modelling of Piezoelectric Sensors and Actuators Incorporated in Intelligent Structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 9, n. 1, p. 3–19, 2016.

CHEN, Y. et al. Novel ultrasonic-assisted vacuum drying technique for dehydrating garlic slices and predicting the quality properties by low field nuclear magnetic resonance. **Food Chemistry**, v. 306, p. 125625, 2020.

CHU, Y. et al. Application of ultrasound and curing agent during osmotic dehydration to improve the quality properties of freeze-dried yellow peach (*Amygdalus persica*) slices. **Agriculture**, v. 11, n. 11, p. 1069, 2021.

CICHOWSKA-BOGUSZ, J. et al. Physicochemical properties of dried apple slices: impact of osmo-dehydration, sonication, and drying methods. **Molecules**, v. 25, n. 5, p. 1078, 2020.

COLUCCI, D. et al. On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant. **Food Research International**, v. 106, p. 580–588, 2018.

CORRÊA J. L. G. et al. Dried yacon with high fructooligosaccharide content. *Journal of Food Process Engineering*, v. 44, n. 12, p. e13884, 2021a.

CORRÊA J. L. G. et al. Drying of persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.) pretreated by different osmotic processes. *Journal of Food Process Engineering*, v. 44, n. 10, p. e13809, 2021b.

CORRÊA, J. L. G. et al. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 41, p. 284–291, 2017.

CORRÊA, J. L. G. et al. Drying of persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.) pretreated by different osmotic processes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 10, p. e13809, 2021.

CORRÊA J. L. G. et al. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 41, p. 284-291, 2017.

CORRÊA, J. L. G. et al. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 4, p. 498–504, 2010.

CORRÊA, J. L. G. et al. Osmotic dehydration of tomato assisted by ultrasound: evaluation of the liquid media on mass transfer and product quality. **International journal of food engineering**, v. 11, n. 4, p. 505-516, 2015.

DA CUNHA, R. M. C. et al. Effect of ethanol pretreatment on melon convective drying. **Food Chemistry**, v. 333, p. 127502, 2020.

DA SILVA JUNIOR, E. V. et al. Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **Lwt**, v. 97, p. 317-322, 2018.

DE OLIVEIRA et al. Reuse of sorbitol solution in pulsed vacuum osmotic dehydration of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 6, p. e13306, 2017.

DEHGHAN, B.; KENARI, R. E.; STUDENT, P. D. Comparison of bath and probe sonication for osmotic dehydration of peach slices: Study on the qualitative and nutritional properties. **Journal of Food Biosciences and Technology**. v. 11, n. 1, p.43-54, 2021.

DEHGHANNYA, J.; GORBANI, R.; GHANBARZADEH, B. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on drying kinetics and effective moisture diffusivity of mirabelle plum. **Journal of food processing and preservation**, v. 39, n. 6, p. 2710-2717, 2015.

DEVIC, E. et al. Retention of polyphenols and ascorbic acid in apples: impact of osmotic dehydration and convective drying. **International Drying Symposium**, 2010.

DIAS DA SILVA, G. et al. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT**, v. 74, p. 114–119, 2016.

DO CARMO, J. R. et al. Properties of isomaltulose (Palatinose®) – An emerging healthy carbohydrate: Effect of temperature and solute concentration. **Journal of Molecular Liquids**, v. 347, p. 118304, 2022.

ERCAN, S. S.; SOYSAL, C. Use of ultrasound in food preservation. **Natural Science**, v. 2013, n. 08, p. 5–13, 2013.

FAN, D. et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the properties of freeze-dried carrot slices by traditional and infrared freeze-drying technologies. **Drying technology**, v. 39, n. 9, p. 1176–1183, 2020.

FAN, K.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 39, p. 47–57, 2017.

FENG, H.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; WEISS, J. **Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing**. New York, NY: Springer New York, 2011.

FERNANDES, F. et al. Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. **Journal of food science and technology**, v. 56, p. 1793-1800, 2019.

FERNANDES; LINHARES JR; RODRIGUES. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics sonochemistry*, v. 15, n. 6, p. 1049-1054, 2008.

FERNANDES; RODRIGUES. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, v. 82, n. 2, p. 261-267, 2007.

FERNÁNDEZ, P. R.; LOVERA, N.; RAMALLO, L. A. Sucrose syrup reuse during one- and multi-stage osmotic dehydration of pineapple. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 6, 2020.

FONG-IN, S. et al. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of litchi: effect of pretreatment on mass transfer and quality attributes during frozen storage. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, n. 4, p. 3590–3597, 2021.

GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. In: POVEY, M. J. W.; MASON, T. J. (Eds.). **Ultrasound in Food Processing**. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, p. 127–143, 1999.

GIANNAKOUROU, M. C.; LAZOU, A. E.; DERMESONLOUOGLOU, E. K. Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in solutions of non-conventional sweeteners by response surface methodology and desirability approach. **Foods**, v. 9, n. 10, p. 1393, 2020.

GREMBECKA, M. Natural sweeteners in a human diet. **Roczniki Państwowego Zakładu Higieny**, v. 66, n. 3, 2015.

GUIMARÃES, B. et al. Ultrasound-assisted hydration of wheat grains at different temperatures and power applied: Effect on acoustic field, water absorption and germination. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 155, p. 108045, 2020.

HAMEDI, F. et al. Ultrasound-assisted osmotic treatment of model food impregnated with pomegranate peel phenolic compounds: Mass transfer, texture, and phenolic evaluations. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 5, p. 1061–1074, 2018.

HASAN, M. U. et al. Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 12, p. e14280, 2019.

HUA, Q. et al. Metabolomic characterization of pitaya fruit from three red-skinned cultivars with different pulp colors. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 126, p. 117–125, 2018.

HUANG, D. et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 63, p. 104950, 2020.

INFANTE, R. A. et al. Ultrasound pretreatment application in dehydration: its influence on the microstructure, antioxidant activity and carotenoid retention of biofortified Beauregard sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam). **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 12, p. 4542–4549, 2021.

JACKMAN, R. L.; STANLEY, D. W. Perspectives in the textural evaluation of plant foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 6, n. 6, p. 187–194, 1995.

JAYAS, D. S. Food Dehydration. **Reference Module in Food Science**, p. 1–10, 2016.

JIANG, J. et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries. **LWT**, v. 145, p. 111300, 2021.

JIN, W.; ZHANG, M.; SHI, W. Evaluation of ultrasound pretreatment and drying methods on selected quality attributes of bitter melon (*Momordica charantia* L.). **Drying Technology**, v. 37, n. 3, p. 387–396, 2019.

KAHRAMAN, O. et al. Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, p. 105510, 2021.

KANG, D. C. et al. Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and NaCl concentration. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 35, p. 36–44, 2016.

KASAAI, M. R.; KASAAI, M. R. Input power-mechanism relationship for ultrasonic Irradiation: Food and polymer applications. **Natural Science**, v. 5, n. 8, p. 14–22, 2013.

KAUR, D. et al. Osmotic dehydration of fruits using unconventional natural sweeteners and non-thermal-assisted technologies: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, p. e16890, 2022.

KEK, S. P.; CHIN, N. L.; YUSOF, Y. A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. **Food and Bioprocesses Processing**, v. 91, n. 4, p. 495–506, 2013.

KOBUS, Z.; KUSIŃSKA, E. Influence of physical properties of liquid on acoustic power of ultrasonic processor. **Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa**, v. 8, p. 71–78, 2008.

KONOPACKA, D. et al. The combined effect of ultrasound and enzymatic treatment on the nanostructure, carotenoid retention and sensory properties of ready-to-eat carrot chips. **LWT**, v. 85, p. 427–433, 2017.

KOWALSKA, H. et al. The impact of using polyols as osmotic agents on mass exchange during osmotic dehydration and their content in osmodehydrated and dried apples. **Drying Technology**, v. 38, n. 12, p. 1620–1631, 2020.

KOWALSKI, S. J.; MIERZWA, D.; STASIAK, M. Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions. **Drying Technology**, v. 35, n. 8, p. 939–947, 2017.

KROEHNKE, J. et al. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) – The influence of ultrasound on process kinetics and product quality. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 71, p. 105377, 2021.

KWIATKOWSKI, M. et al. Microwave-assisted and conventional phenolic and colour extraction from grape skins of commercial white and red cultivars at veraison and harvest. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 122671, 2020.

LEAHU, A.; GHINEA, C.; ROPCIUC, S. Mass transfer during osmotic dehydration of quince using different osmosis solutions. **Ukrainian Food Journal**, v. 10, n. 1, p. 100–111, 2021.

LEIGHTON, T. G. The principles of cavitation. In: MASON, T. J.; POVEY, M. J. W. (Eds.). **Ultrasound in Food Processing**. London: Chapman & Hall, p. 151–182, 1998.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. **Drying Technology**, v. 14, n. 2, p. 391413, 1996.

LI, L. et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the drying characteristics and quality properties of Sanhua plum (*Prunus salicina* L.). **LWT**, v. 138, p. 110653, 2021.

LI, X. et al. The impact of ultrasonic treatment on blueberry wine anthocyanin color and its In-vitro antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v. 333, p. 127455, 2020.

LINGYU YU; GIURGIUTIU, V. Multi-mode damage detection methods with piezoelectric wafer active sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, n. 11, p. 1329–1341, 2009.

LLAVATA, B. et al. Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. **Current Opinion in Food Science**, v. 35, p. 20-26, 2020.

MA, Y. et al. Effect of ultrasound on mass transfer kinetics and phenolic compounds of apple cubes during osmotic dehydration. **LWT**, v. 151, p. 112186, 2021.

MA, Y. et al. Understanding of osmotic dehydration on mass transfer and physical properties of freeze-dried apple slices: A comparative study of five saccharides osmotic agents. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 3, p. e16328, 2022.

MACEDO et al. The impact of using vacuum and isomaltulose as an osmotic agent on mass exchange during osmotic dehydration and their effects on qualitative parameters of strawberries. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 8, p. e14057, 2022.

MAGALHÃES, M. L. et al. Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, v. 215, p. 72–77, 2017.

MALDONADO, M.; GONZÁLEZ PACHECO, J. Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries. **Heliyon**, v. 8, n. 1, p. e08788, 2022.

MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E. et al. Evaluation of ascorbic acid impregnation by ultrasound-assisted osmotic dehydration in plantain. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n.10, p. e16839, 2022.

MARTINS, A. F. L. et al. Use of ultrasound and ethanol to improve the drying of yacon potato (*Smallanthus sonchifolius*): Effect of chemical and thermal bleaching. **LWT**, v. 162, p. 113448, 2022.

MARTINS, M. J. N. et al. Thermophysical properties of carbohydrate solutions: Correlation between thermal and transport properties. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 9, 2020.

MASON, T. J.; CORDEMANS, E. D. Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: A review. **Chemical Engineering Research & Design**, v. 17, p. 511–516, 1996.

MCCLEMENTS, D. J. Ultrasonic characterization of foods and drinks: Principles, methods, and applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 37, n. 1, p. 1–46, 1997.

MEENA, N.; PRINCE, M. V.; SREEJA, R. Optimization of process parameters for ultrasound-assisted osmotic dehydration of pineapple slices using response surface methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 9, p. e16507, 2022.

MEHTA, A. et al. Ultrasonic induced effect on mass transfer characteristics during osmotic dehydration of aonla (*Phyllanthus emblica L.*) slices: A mathematical modeling approach. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 12, p. e13887, 2021.

MENDONÇA et al. Mass transfer kinetics of the osmotic dehydration of yacon slices with polyols. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 1, p. e12983, 2017.

MENON, A.; STOJCESKA, V.; TASSOU, S. A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 100, p. 67–76, 2020.

MIANO, A. C. et al. Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 38996., 2016.

MISTEWICZ, K. et al. Nanogenerator for determination of acoustic power in ultrasonic reactors. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 78, p. 105718, 2021.

MOORADIAN, A. D.; SMITH, M.; TOKUDA, M. The role of artificial and natural sweeteners in reducing the consumption of table sugar: A narrative review. **Clinical Nutrition ESPEN**, v. 18, p. 1–8, 2017.

MOUSAKHANI-GANJEH, A. et al. Electro-based technologies in food drying - A comprehensive review. **LWT**, v. 145, p. 111315, 2021.

MULET, A. et al. Low intensity ultrasonics in food technology. **Food Science and Technology International**, v. 5, n. 4, p. 285-297, 1999.

MURALIDHARA, H. S.; ENSMINGER, D.; PUTNAM, A. Acoustic dewatering and drying (low and high frequency): State of the art review. **Drying Technology**, v. 3, n. 4, p. 529–566, 1985.

NIMITKEATKAI, H. et al. Commercial active packaging maintaining physicochemical qualities of carambola fruit during cold storage. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 32, p. 100834, 2022.

NOWACKA, M. et al. Effect of ultrasound treatment during osmotic dehydration on bioactive compounds of cranberries. **Ultrasonics**, v. 83, p. 18-25, 2018.

NOWACKA, M. et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 41, p. 71–78, 2017.

NOWACKA, M.; WEDZIK, M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. **Applied Acoustics**, v. 103, p. 163–171, 2016.

OLADEJO, A. O. et al. Effects of ultrasound on mass transfer kinetics, structure, carotenoid and vitamin c content of osmo-dehydrated sweet potato (*Ipomea Batatas*). *Food and Bioprocess Technology*, v. 10, n. 6, p. 1162–1172, 2017.

ÖNAL, B. et al. Microwave and ultrasound pre-treatments for drying of the “*Rocha*” pear: impact on phytochemical parameters, color changes and drying kinetics. *Foods*, v. 10, v. 10, n. 4, p. 853, 2021.

OSAE, R. et al. Nonthermal pretreatments enhances drying kinetics and quality properties of dried ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) slices. *Journal of Food Process Engineering*, v. 42, n. 5, p. e13117, 2019.

PANDISELVAM, R. et al. Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *Journal of Texture Studies*, v. 53, n. 6, p. 737-762, 2021.

PANDISELVAM, R. et al. Individual and interactive effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and biochemical qualities of food: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 92, p. 106261, 2023.

PATEIRO, M. et al. The role of emerging technologies in the dehydration of berries: Quality, bioactive compounds, and shelf life. *Food Chemistry: X*, v. 16, p. 100465, 2022.

PATTANAPA, K. et al. Effect of sucrose and glycerol mixtures in the osmotic solution on characteristics of osmotically dehydrated mandarin cv. (*Sai-Namphaung*). *International Journal of Food Science & Technology*, v. 45, n. 9, p. 1918–1924, 2010.

PERTUZATTI, P. B. et al. Carotenoids, tocopherols and ascorbic acid content in yellow passion fruit (*Passiflora edulis*) grown under different cultivation systems. *LWT*, v. 64, n. 1, p. 259–263, 2015.

PESSOA, T. R. B. et al. Osmotic Dehydration of Cassava Cubes: Kinetic Analysis and Optimization. *Diffusion Foundations*, v. 25, p. 99–113, 2020.

PINJARI, D. V.; PANDIT, A. B. Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 17, n. 5, p. 845–852, 2010.

PIRCE, F. et al. Effects of convective drying assisted by ultrasound and osmotic solution on polyphenol, antioxidant and microstructure of murtilla (*Ugni molinae Turcz*) fruit. *Journal of Food Science and Technology*, v. 58, p. 138-146, 2021.

POLACHINI, T. C. et al. Acoustic fields of acid suspensions containing cassava bagasse: Influence of physical properties on acoustic attenuation. *Applied Acoustics*, v. 177, p. 107922, 2021a.

POLACHINI, T. C. et al. Ultrasound-assisted acid hydrolysis of cassava (*Manihot esculenta*) bagasse: Kinetics, acoustic field and structural effects. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 70, 2021b.

PROSAPIO, V.; NORTON, I. Simultaneous application of ultrasounds and firming agents to improve the quality properties of osmotic + freeze-dried foods. **LWT**, v. 96, p. 402–410, 2018.

RAHAMAN, A. et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 58, p. 104643, 2019.

RAHIMI, N.; AHRARITABAS, A.; ANSARIFAR, E. Optimization of ultrasound-assisted osmotic dehydration of white mulberry. **Journal of Food Processing and Preservation**, p. e16966, 2022.

RAHMAN, S. M. A.; SHARMA, P.; SAID, Z. Application of response surface methodology based d-optimal design for modeling and optimisation of osmotic dehydration of zucchini. **Digital Chemical Engineering**, v. 4, p. 100039, 2022.

RAMYA, V.; JAIN, N. K. A Review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: an integrated approach. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, p. e12440, 2017.

RAOULT-WACK, A. L. et al. Modeling of dewatering and impregnation soaking process (osmotic dehydration). **Food Research International**, v. 27, n. 2, p. 207–209, 1994.

RASHID, M. T. et al. Modeling the drying of ultrasound and glucose pretreated sweet potatoes: The impact on phytochemical and functional groups. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 68, p. 105226, 2020.

RASO, J. et al. Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 5, n. 4, p. 157–162, 1999.

RAWSON, A. et al. Effect of ultrasound and blanching pretreatments on polyacetylene and carotenoid content of hot air and freeze dried carrot discs. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 18, n. 5, p. 1172–1179, 2011.

RECUERO, M. **Ingeniería acústica**. Madrid: Paraninfo, 1995.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 49, p. 65–75, 2018a.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. **Journal of Food Engineering**, v. 233, p. 17–27, 2018b.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 61, p. 102328, 2020.

ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, v. 119, p. 20–30, 2020.

SAGAR, V. R.; KUMAR, P. S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 1, p. 15–26, 2010.

SAKOOEI-VAYGHAN, R. et al. Effects of osmotic dehydration (with and without sonication) and pectin-based coating pretreatments on functional properties and color of hot-air dried apricot cubes. **Food Chemistry**, v. 311, p. 125978, 2020.

SALEHI, F. Recent advances in the ultrasound-assisted osmotic dehydration of agricultural products: A review. **Food Bioscience**, v. 51, p. 102307, 2023.

SANTOS, K. C. et al. Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 70, p. 105304, 2021.

SANTOS, N. C. et al. Influence of ethanol and ultrasound on drying, bioactive compounds, and antioxidant activity of strawberries (*Fragaria × ananassa*). **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 99, n. 7, p. 100542, 2022.

SARPONG, F. et al. The kinetics and thermodynamics study of bioactive compounds and antioxidant degradation of dried banana (*Musa ssp.*) slices using controlled humidity convective air drying. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 12, n. 3, p. 1935–1946, 2018.

SCHÖSSLER, K.; JÄGER, H.; KNORR, D. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 1, p. 103–110, 2012.

SHEN, Y. et al. Effects of temperature-controlled ultrasound treatment on sensory properties, physical characteristics and antioxidant activity of cloudy apple juice. **LWT**, v. 142, p. 111030, 2021.

SINGH, A. et al. Ultrasonic modulated osmotic dehydration of Aonla (*Phyllanthus emblica L.*) slices: An integrated modeling through ANN, GPR, and RSM. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 2, p. e16247, 2022.

SINGLA, M.; SIT, N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, p. 105506, 2021.

SOUZA DA SILVA, E. et al. Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine. **Journal of Food Engineering**, v. 246, p. 119–124, 2019.

SPINEI, M.; OROIAN, M. The influence of osmotic treatment assisted by ultrasound on the physico-chemical characteristics of blueberries (*Vaccinium myrtillus* L.). **Ultrasonics**, v. 110, p. 106298, 2021.

SUN, Q. et al. Geographic variation of fruit color dimorphism in *Viscum coloratum* (Kom.) Nakai in northeast China. **Flora**, v. 280, p. 151846, 2021.

SZADZIŃSKA, J. et al. Microwave-and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes. **Drying Technology**, v. 37, n. 1, p. 1-12, 2019.

SZADZIŃSKA, J. et al. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. **Drying Technology**, v. 38, n. 1-2, p. 93-107, 2020.

SZADZIŃSKA, J.; MIERZWA, D.; MUSIELAK, G. Ultrasound-assisted convective drying of white mushrooms (*Agaricus bisporus*). **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 172, p. 108803, 2022.

TAO, Y. et al. Comparison between airborne ultrasound and contact ultrasound to intensify air drying of blackberry: Heat and mass transfer simulation, energy consumption and quality evaluation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 72, p. 105410, 2021.

TAO, Y. et al. Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. **Journal of Food Engineering**, v. 235, p. 79–88, 2018.

THANOMPONGCHART, P.; PINTANA, P.; TIPPAYAWONG, N. Thermal performance enhancement in hot air and solar drying of pineapple slices with ultrasonic vibration. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 37, p. 102296, 2022.

TORREGGIANI, D.; BERTOLO, G. High-Quality Fruit and Vegetable Products Using Combined Processes. **Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation**, v. 1, p. 3–10, 2019.

VILLA-VÉLEZ, H. A. et al. Identification of acoustic fields in aqueous biomass solutions of banana waste pretreated by power ultrasound. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 8, p. 87-96, 2018.

WAGHMARE, R. et al. Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: An innovative approach for the retention of nutraceutical quality in foods. **Food Chemistry**, v. 404, p. 134571, 2023.

WU, B. et al. Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure. **Food Chemistry**, v. 358, p. 129845, 2021.

XU, B. et al. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. **Food Research International**, v. 152, p. 110744, 2022.

XU, X. et al. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 70, p. 105300, 2021.

YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal Food Science Technology**, v. 51, n. 9, p. 1654–1673, 2012.

YILDIZ, G.; IZLI, G. The effect of ultrasound pretreatment on quality attributes of freeze-dried quince slices: Physical properties and bioactive compounds. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 5, p. e13223, 2019.

ZHANG, L. et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying. **Food Chemistry**, v. 303, p. 125386, 2020.

ZHANG, L. et al. Impact of ultrasound combined with ultrahigh pressure pretreatments on color, moisture characteristic, tissue structure, and sensory quality of freeze-dried strawberry slices. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 3, p. e15200, 2021.

ZHAO, J. H. et al. Effects of different osmo-dehydrofreezing treatments on the volatile compounds, phenolic compounds and physicochemical properties in mango (*Mangifera indica* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 51, n. 6, p. 1441–1448, 2016.

ZHU, R. et al. Dehydration of apple slices by sequential drying pretreatments and airborne ultrasound-assisted air drying: Study on mass transfer, profiles of phenolics and organic acids and PPO activity. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 75, p. 102871, 2022a.

ZHU, J. et al. Effects of different drying methods on the physical properties and sensory characteristics of apple chip snacks. **LWT**, v. 154, p. 112829, 2022b.

ZONGO, A. P.; KHALLOUFI, S.; RATTI, C. Effect of viscosity and rheological behavior on selective mass transfer during osmotic dehydration of mango slices in natural syrups. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 7, p. e13745, 2021.

5. CAPÍTULO 2

Journal of Food Process Engineering, 2020, e13483, p.1-15.

Thermophysical properties of carbohydrate solutions: Correlation between thermal and transport properties

Maria Júlia Neves Martins¹, Bianca Guimarães¹, Tiago Carregari Polachini^{1,2} e
Javier Telis-Romero¹

¹ Food Engineering and Technology Department, São Paulo State University (Unesp), Institute of Biosciences, Humanities and Exact Sciences (Ibilce), Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brazil.

² Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València (UPV), Valencia, 46071, Spain.

Abstract: Sugar solutions such as sucrose, glucose and fructose are often used in osmotic dehydration processes. Thus, the experimental determination of their thermophysical properties is a must for designing purposes. Density, specific heat and thermal conductivity were determined in a wide range of solute concentration (10–60 °Brix) and temperature (273.15–358.15 K). Empirical equations were considered to fit the experimental data and to evaluate the data behavior. An assessment based on the Prandtl number was considered to correlate thermal and rheological data. Higher density and lower specific heat and thermal conductivity values were observed when temperature decreased and solute concentration increased. Prandtl number behaved similarly as density, indicating that momentum transfer is favored in comparison with heat transfer in concentrated solutions at low temperatures. A versatile polynomial model concerning the significant variables could predict the experimental values for all solutions with good accuracy ($R^2 > 0.9863$ and $MRE < 1.20\%$). Reported data and equations showed to be essential for engineering aspects and transport phenomena analysis.

Practical Applications: Sucrose, glucose and fructose solutions are commonly used in osmotic dehydration processes to promote solute incorporation, increasing shelf-life and quality of food products. The availability of thermophysical properties in a wide range of solute concentration and temperature covers the most of conventional and non-conventional conditions for designing osmotic dehydration and many other food processes. Among the unit operations, it could be found pumping, mixing/stirring, pasteurization, sterilization, evaporation and so on. These data are useful to understand how properties change when the conditions are altered during the processes. They also provide important information about momentum and heat transfer through the fluid. By analyzing dimensionless parameters, as Prandtl number, one phenomenon or other can be favored under specific conditions. The presence of accurate mathematical models results in greater agility and reliability in the execution of processes, especially for those operating in wide ranges of temperature and solute concentration.

5.1. Introduction

Determining thermophysical properties of carbohydrate solutions is necessary for designing heat, mass and momentum transfer involved in processes such as osmotic dehydration of food products. Even though there is a broad database of food solutions, there is still a lack for solutions containing important carbohydrate such as sucrose, glucose and fructose in wide ranges of temperature and solute concentration.

Sucrose, for example, is a very common disaccharide composed by fructose and glucose monomers. It is widely used in the most traditional process of osmotic dehydration due to its low cost and sweetener potential. Additionally, it behaves as polyphenol oxidase effective inhibitor and prevents the loss of volatile compounds of interest (DEHGHANNYA; HOSSEINLAR; HESHMATI, 2018).

The fructose monosaccharide is naturally found in fruits, honey, vegetables and syrups. It has a sweetness level 30–80% higher when compared to sucrose – being this percentage dependent on the serving temperature (KEIM; STANHOPE; HAVEL, 2016). It can be obtained from glucose-fructose mixture through separation processes such as ion exchange chromatography technique (HEINONEN et al., 2018), nanofiltration (MOULIK et al., 2015) and crystallization (SILVA et al., 2010). The commercialization of fructose has also been boosted not only due to its sweetener potential but also to its high osmotic pressure and high solubility. These characteristics prevents the formation of sugar crystal in food products subjected to osmotic dehydration, for example (BARREIROS; BOSSOLAN; TRINDADE, 2005; MOULIK et al., 2015).

Glucose is another monosaccharide found in the composition of most food products. Bioprocesses, as the enzymatic hydrolysis of starches, are alternatives for producing glucose syrup for the most diverse applications (VAN DER MAAREL et al., 2002). Food dehydrated with osmotic solutions of glucose and fructose demonstrated to be more impregnated as a consequence of their low molecular weight when compared to sucrose solutions (OLIVEIRA et al., 2016).

However, the design of osmotic dehydration processes depends not only on the osmotic solutions but also on their solute concentration and working temperature – which leads to solutions with different thermophysical properties. Diffusion rate of food moisture and solute as well as weight gain by the product is expected to increase with increasing temperature and solute concentration, mainly if these conditions are applied in the early stages of process (RAMYA; JAIN, 2017). A wide range of solute

concentration and temperature are commonly reported in literature to be used in osmotic dehydration, being them between 30 and 60 °Brix and from 293.15 up to 333.15 K, respectively (AMAMI et al., 2017; BARMAN; BADWAIK, 2017; BOZKIR et al., 2019; ASSIS; MORAIS; MORAIS, 2016).

The agitation of the medium also affects the dehydration kinetics by reducing the resistance to mass transfer in the liquid-side and keeping constant the driving force by the rise in the momentum transfer (RASTOGI et al., 2002). These two phenomena (heat and momentum transfer) can be correlated by dimensionless analysis based on the Prandtl number, which also demands information about the thermophysical properties of the solutions. This analysis provides a picture of the facility to occur momentum transfer, given by kinematic viscosity, in comparison with heat transfer, given by the thermal diffusivity. Moreover, it relates temperature and velocity profile as well as their boundary layer thickness with the magnitude of the Prandtl number (HAYAT et al., 2016).

The availability of thermophysical data and mathematical models for sugar solutions fulfills other needs in addition to osmotic dehydration processes. It is also extremely important for designing basic unit operations that involves the handling of sugar solutions in the production of jellies (FIGUEROA; GENOVESE, 2019), ice cream (WICHAMANEE; ACHARAPHAN; SANTAD, 2016) and chocolates (OSTROWSKA-LIGEZA et al., 2019), for example.

In literature, there is a data scarcity regarding density of carbohydrate solutions. The existing data are reported in small ranges of temperature or solute concentration – reinforcing the need by the data scanning in wider ranges than the ones commonly found. In the study of Darros-Barbosa, Balaban and Teixeira (2003), density of sucrose, glucose and fructose solutions were punctually reported in the concentrations of 1, 10 and 50 °Brix and temperatures of 288.15, 293.15, 298.15 and 313.15 K. Raventós et al. (2007) presented density values for sucrose, glucose and fructose solutions in concentrations between 5 and 40 °Brix at low temperatures (from 270.55 to 295.65 K), when working with cryo-concentration. Ali et al., (2014) determined the density of aqueous solutions of glucose and sucrose with concentrations of ~0.2 to ~1.8 °Brix at temperatures between 298.15 and 313.15 K.

On the other hand, thermal properties (specific heat, thermal diffusivity and thermal conductivity) of simple carbohydrates solutions are even more difficult to find in the literature, regardless the conditions of temperature and concentration. Their

accurate determination provides reliable data for understanding and designing heat transfer processes. Techniques as differential scanning calorimetry (DSC) have been proven to be very accurate in determining specific heat of food products (LEILA et al., 2019; PARNIAKOVA et al., 2018; CASTILHOS et al., 2018). Systems properly designed with electrical resistance and metallic cell also demonstrated to be useful and accurate for determining thermal conductivity (COSTA; SILVA; VIEIRA, 2019), while thermal diffusivity can be easily obtained by correlating the aforementioned properties.

Therefore, this study was focused on the experimental determination of density, specific heat and thermal conductivity for sucrose, glucose and fructose solutions in wider range of solute concentration (10 to 60 °Brix) and temperature (273.15 to 358.15 K) than the ones found in literature. A proper mathematical modeling was used to accurately predict the experimental data as well as to evaluate how the studied properties behave when solute concentration and/or temperature changed. Together with previously reported data of viscosity (TELIS et al., 2007), an unprecedented dimensionless analysis based on the Prandtl number was presented to correlate thermal and transport properties for the studied solutions.

5.2. Materials and Methods

5.2.1. Samples Preparation

Sucrose, glucose and fructose solutions were prepared by dissolving analytical grade solutes (Sigma Aldrich, Germany) in distilled water. Using a semi analytical balance with precision of ± 0.01 g (AUX220, Shimadzu, Japan), different concentrations were obtained for each solute: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 °Brix, considering that 1 °Brix is equivalent to 1 g of soluble solids (solute) per 100 g of solution. The solutions were kept under magnetic stirring (C-MAG HS 7, IKA, USA) for 1 hour at a temperature of 333.15 K, until the solute was completely dissolved.

5.2.2. Density (ρ) measurements

The density (ρ) of the sucrose, glucose and fructose solutions were determined in a DMA 4500M density meter (Anton Paar, Austria). Before starting the measurements, the equipment was calibrated with air and deionized water. The equipment was programmed to perform measurements at 273.15, 278.15, 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 308.15, 313.15, 318.15, 323.15, 328.15, 333.15, 338.15, 343.15, 353.15 and 358.15 K for each solution under each concentration studied. The analyses were carried

out in triplicate using a sample volume of approximately 2 mL. The results obtained were transferred to the computer through a data acquisition system.

5.2.3. Specific heat (c_p) measurements

The specific heat values (c_p) of the sucrose, glucose and fructose solutions were determined through a differential scanning calorimeter (model DCS 8000, Perkin Elmer, Shelton, USA), which evaluated the energy changes in the material based on a heat flow.

The determinations followed the ASTM E-1269-05 method for thermally stable solids and liquids (ASTM, 2005), in which 24.01 ± 0.04 mg aluminum pots (ref 0219-0062, Perkin Elmer, USA) were used as containers, and approximately 5 μ L of sample were inserted for subsequent hermetic sealing.

The equipment calibration was carried out with indium ($T_f=429.75$ K; $\Delta H=28.45$ kJ $\cdot$ kg $^{-1}$) by applying a heat flow of 283.15 K $\cdot$ min $^{-1}$ along with nitrogen purge gas with 99.5% purity at 20 mL $\cdot$ min $^{-1}$. Sapphire discs with 3 mm diameter (ref 0219-1268, Perkin Elmer, Shelton, USA) were used as a reference material (ARCHER, 1993).

The samples, the reference material and the baseline were submitted to the same thermal program: isothermal at 273.15 K for 4 min; 10 K $\cdot$ min $^{-1}$ heat flow until the temperature reached 363.15 K to be, then, kept isothermal for another 4 min. The specific heat was calculated in triplicate at the temperatures of 273.15, 278.15, 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 308.15, 313.15, 318.15, 323.15, 328.15, 333.15, 338.15, 343.15, 353.15 and 358.15 K using the data acquired by the PYRIS 10.1 software (Perkin Elmer, Shelton, USA). Equation (5.1) was used to calculate the specific heat c_p (J $\cdot$ kg $^{-1}$ $\cdot$ K $^{-1}$), in which D_s is the vertical displacement between the sample curves and the reference material curve at a given temperature (mW), θ is the heat flow (K $\cdot$ s $^{-1}$) and W_s is the sample mass (kg).

$$c_p = \frac{D_s}{W_s \theta} \quad (5.1)$$

5.2.4. Thermal conductivity measurements

Thermal conductivity (λ , W $\cdot$ m $^{-1}$ $\cdot$ K $^{-1}$) of the carbohydrate solutions was experimentally measured based on the steady-state technique, similarly as done by Costa, Silva and Vieira (2018) for açai-berry pulp. The apparatus, exemplified in Figure

(5.1), consists of a jacketed cylindrical cell with 106 cm of length, 9.8 cm of inner diameter and 12.2 cm of outer diameter. It was made of stainless steel with both ends isolated with Teflon discs (1 cm thickness $\times$ 17 cm diameter) to prevent axial heat transfer. Along the axis of the cell, a thermal resistance of 200 W is placed to emit a uniform heat flux to the samples during the experiments. A laboratory DC power supply (MPS-3006D, Minipa, São Paulo, Brazil) was used to regulated the power input with a stability of 0.05%. Type J thermocouples were placed between the surfaces of the resistance and the inner cylinder to monitor the temperatures, which were recorded using a data logger (NI 9213, National Instruments, Austin, USA). The program used for data acquisition was the LabVIEW software (National Instruments, Austin, USA). The whole cell was immersed in cold water, provided by a thermostatic bath (MA-184, Marconi, São Paulo, Brazil), which controls the temperature in the surface of the cell. The cell was calibrated with water and glycerin as detailed in literature (DICKERSON, 1965).

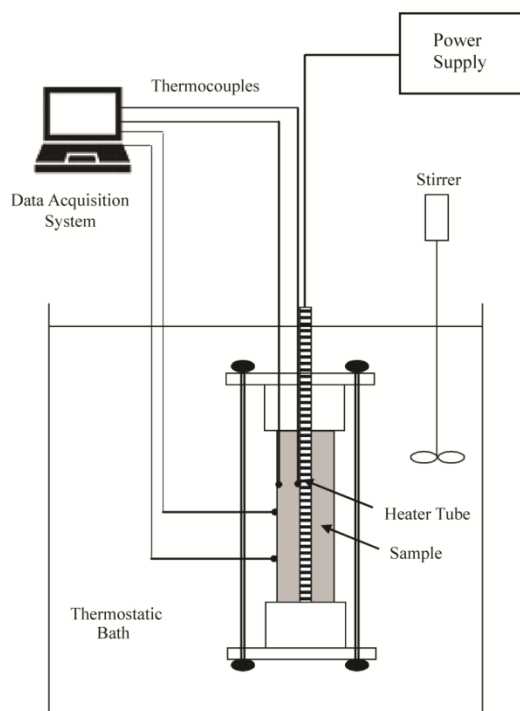


Figure 5.1. Apparatus used for measuring effective thermal conductivity.

Cell was loaded with the specific carbohydrate solution to perform the measurements in triplicate. Then, temperature profile was monitoring during heating at

constant heat flux. When the difference of temperature was almost constant, steady state conditions could be reached and thermal conductivity λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) could be calculated. In this case, heat conduction inside the cell can be described by the Fourier equation in cylindrical coordinates, considering boundary conditions of constant temperature at the two concentric cylindrical surfaces, as given by Equations (5.2)-(5.4).

$$\frac{\partial \dot{q}}{\partial S} = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5.2)$$

$$T(r = R_1) = T_1 \quad (5.3)$$

$$T(r = R_2) = T_2 \quad (5.4)$$

The integral form of Equation (5.2) results in Equation (5.5):

$$\lambda = \dot{q} \frac{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi(T_1 - T_2)} \quad (5.5)$$

where $\dot{q}$ is the heat flux in the thermal resistance (W); r the radius (m); R_1 and R_2 respectively the external and internal radius of the cylinder (m); S the surface area of a cylinder of radius r (m^2); T the temperature (K); T_1 the steady state temperature at the internal cylinder (K); T_2 the steady state temperature in the thermostatic bath where the cell was immersed (K); and λ the thermal conductivity of the sample at the average temperature $(T_1 + T_2)/2$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

5.2.5. Determination of Prandtl number

The phenomenon of heat and transport transfer can be correlated by the dimensionless Prandtl number (Pr) in order to evaluate the facility to occur fluid transport in relation to heat transfer. Thus, it can be determined by the relation between the rate of momentum, given by the kinematic viscosity ($\nu = \text{dynamic viscosity } (\mu)/\rho$), and the heat transfer diffusion, given by thermal diffusivity ($\alpha = \lambda/\rho c_p$), as shown in Equation (5.6) (KHAN et al., 2017):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{\lambda/\rho c_p} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (5.6)$$

In this work, Prandtl number (Pr) was calculated using the experimental mean values of density, specific heat and thermal conductivity for all of the three solutions and the values of dynamic viscosity, reported by Telis et al. (2007), for the same carbohydrate solutions.

5.2.6. Mathematical Modeling

The experimental data of density ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), specific heat c_p ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) and thermal conductivity λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) of the sucrose, glucose and fructose solutions were used to fit four different mathematical models (Table 5.1). These models correlate the corresponding property with temperature T (K) and solute concentration X ($^\circ\text{Brix}$). The STATISTICA 7.0 software was used for the data fitting procedure. The choice of the best model to represent the thermophysical properties for the carbohydrate solutions was made based on the coefficient of determination (R^2) and mean relative error (MRE).

Table 5.1. Mathematical models used to fit the experimental data of density, specific heat and thermal conductivity of sucrose, glucose and fructose solutions.

Model	Equation
$\beta = a \cdot \exp\left(\frac{b}{R \cdot T}\right) \cdot \exp(cX)$	(5.7)
$\beta = a \cdot \exp\left(\frac{b}{R \cdot T}\right) \cdot X^c$	(5.8)
$\beta = a \cdot \exp(bX) \cdot T^c$	(5.9)
$\beta = a + (bX) + (cX^2) + (dT) + (eT^2) + f(XT)$	(5.10)

* β refers to the property studied; a , b and c refer to the model parameters; R is the gas constant ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) T is the temperature (K) and X is the solute concentration ($^\circ\text{Brix}$).

In Table 5.1, the Equation (5.7), (5.8) and (5.9) were commonly used in the literature for the thermophysical properties of food products (CASTILHOS et al., 2017; RIBEIRO et al., 2017). The Equation (5.10) is a generic empirical model that uses the

significant ($p < 0.05$) linear and quadratic parameter that influenced each experimental property.

5.3. Results and Discussion

5.3.1. Density (ρ)

The mean values and standard deviations for density of the sucrose, glucose and fructose solutions were calculated and are shown in Table 5.2. The data ranged from 978.99 to 1191.08 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 981.79 to 1195.13 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and from 980.45 to 1193.63 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for sucrose, glucose and fructose, respectively.

Table 5.2. Means and standard deviation for the density of sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.

Carbohydrate	Temperature (K)	Solute concentration (°Brix)					
		10	20	30	40	50	60
		Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)					
Sucrose	273.15	1040 $\pm$ 6	1068 $\pm$ 6	1097 $\pm$ 7	1127 $\pm$ 7	1158 $\pm$ 8	1190 $\pm$ 5
	278.15	1040 $\pm$ 1	1069 $\pm$ 4	1097 $\pm$ 5	1127 $\pm$ 1	1158 $\pm$ 5	1191 $\pm$ 2
	283.15	1040 $\pm$ 2	1067 $\pm$ 4	1096 $\pm$ 2	1127 $\pm$ 2	1158 $\pm$ 1	1191 $\pm$ 2
	288.15	1039 $\pm$ 2	1066 $\pm$ 1	1095 $\pm$ 1	1126 $\pm$ 2	1157 $\pm$ 1	1191 $\pm$ 4
	293.15	1038 $\pm$ 1	1065 $\pm$ 2	1094 $\pm$ 3	1123 $\pm$ 6	1157 $\pm$ 1	1190 $\pm$ 3
	298.15	1036 $\pm$ 1	1063 $\pm$ 1	1092 $\pm$ 2	1123 $\pm$ 2	1156 $\pm$ 2	1191 $\pm$ 7
	308.15	1030 $\pm$ 4	1058 $\pm$ 3	1087 $\pm$ 3	1119 $\pm$ 6	1152 $\pm$ 2	1188 $\pm$ 5
	313.15	1028 $\pm$ 3	1056 $\pm$ 5	1085 $\pm$ 3	1118 $\pm$ 1	1151 $\pm$ 2	1186 $\pm$ 4
	318.15	1023 $\pm$ 3	1052 $\pm$ 1	1083 $\pm$ 1	1115 $\pm$ 2	1150 $\pm$ 4	1185 $\pm$ 7
	323.15	1020 $\pm$ 4	1050 $\pm$ 4	1081 $\pm$ 3	1112 $\pm$ 7	1147 $\pm$ 1	1184 $\pm$ 6
	328.15	1014 $\pm$ 9	1046 $\pm$ 1	1078 $\pm$ 1	1111 $\pm$ 2	1145 $\pm$ 1	1181 $\pm$ 4
	333.15	1010 $\pm$ 1	1041 $\pm$ 2	1074 $\pm$ 5	1107 $\pm$ 6	1143 $\pm$ 1	1177 $\pm$ 6
	338.15	1005 $\pm$ 3	1037 $\pm$ 1	1071 $\pm$ 1	1105 $\pm$ 1	1140 $\pm$ 4	1177 $\pm$ 5
	343.15	999 $\pm$ 1	1033 $\pm$ 1	1068 $\pm$ 1	1102 $\pm$ 1	1138 $\pm$ 1	1173 $\pm$ 2
	353.15	986 $\pm$ 1	1023 $\pm$ 1	1059 $\pm$ 2	1096 $\pm$ 1	1132 $\pm$ 2	1166 $\pm$ 6
	358.15	979 $\pm$ 5	1018 $\pm$ 1	1056 $\pm$ 5	1093 $\pm$ 1	1128 $\pm$ 1	1163 $\pm$ 1
Glucose	273.15	1040 $\pm$ 6	1068 $\pm$ 11	1099 $\pm$ 8	1129 $\pm$ 8	1160 $\pm$ 11	1191 $\pm$ 4
	278.15	1041 $\pm$ 9	1072 $\pm$ 11	1099 $\pm$ 9	1128 $\pm$ 7	1160 $\pm$ 8	1193 $\pm$ 11
	283.15	1041 $\pm$ 9	1068 $\pm$ 13	1098 $\pm$ 13	1129 $\pm$ 14	1160 $\pm$ 7	1191 $\pm$ 8
	288.15	1041 $\pm$ 13	1068 $\pm$ 7	1097 $\pm$ 4	1128 $\pm$ 7	1159 $\pm$ 3	1193 $\pm$ 6
	293.15	1039 $\pm$ 4	1066 $\pm$ 4	1097 $\pm$ 2	1123 $\pm$ 2	1159 $\pm$ 2	1191 $\pm$ 3
	298.15	1037 $\pm$ 7	1064 $\pm$ 4	1094 $\pm$ 5	1125 $\pm$ 11	1158 $\pm$ 4	1195 $\pm$ 6
	308.15	1030 $\pm$ 1	1058 $\pm$ 2	1088 $\pm$ 2	1118 $\pm$ 6	1153 $\pm$ 15	1192 $\pm$ 4
	313.15	1030 $\pm$ 7	1059 $\pm$ 6	1085 $\pm$ 7	1119 $\pm$ 9	1153 $\pm$ 7	1186 $\pm$ 6
	318.15	1024 $\pm$ 3	1053 $\pm$ 6	1085 $\pm$ 6	1116 $\pm$ 2	1153 $\pm$ 2	1189 $\pm$ 5
	323.15	1022 $\pm$ 7	1052 $\pm$ 5	1083 $\pm$ 4	1112 $\pm$ 11	1149 $\pm$ 8	1187 $\pm$ 8
	328.15	1012 $\pm$ 3	1047 $\pm$ 6	1079 $\pm$ 6	1112 $\pm$ 7	1147 $\pm$ 1	1185 $\pm$ 8
	333.15	1012 $\pm$ 15	1042 $\pm$ 1	1073 $\pm$ 1	1107 $\pm$ 2	1144 $\pm$ 4	1177 $\pm$ 7
	338.15	1007 $\pm$ 1	1039 $\pm$ 10	1073 $\pm$ 7	1107 $\pm$ 13	1143 $\pm$ 1	1180 $\pm$ 8
	343.15	1000 $\pm$ 3	1034 $\pm$ 7	1069 $\pm$ 2	1104 $\pm$ 2	1139 $\pm$ 3	1175 $\pm$ 8
	353.15	987 $\pm$ 3	1024 $\pm$ 3	1060 $\pm$ 3	1097 $\pm$ 3	1134 $\pm$ 3	1165 $\pm$ 4
	358.15	982 $\pm$ 5	1019 $\pm$ 1	1059 $\pm$ 2	1094 $\pm$ 2	1130 $\pm$ 2	1165 $\pm$ 13
Fructose	273.15	1042 $\pm$ 7	1068 $\pm$ 7	1100 $\pm$ 10	1130 $\pm$ 10	1160 $\pm$ 11	1194 $\pm$ 6
	278.15	1043 $\pm$ 5	1069 $\pm$ 6	1100 $\pm$ 11	1129 $\pm$ 4	1161 $\pm$ 10	1191 $\pm$ 2
	283.15	1040 $\pm$ 2	1067 $\pm$ 6	1095 $\pm$ 3	1126 $\pm$ 3	1158 $\pm$ 2	1193 $\pm$ 6
	288.15	1038 $\pm$ 3	1067 $\pm$ 2	1098 $\pm$ 2	1128 $\pm$ 3	1160 $\pm$ 2	1192 $\pm$ 2
	293.15	1040 $\pm$ 2	1067 $\pm$ 2	1096 $\pm$ 5	1127 $\pm$ 8	1159 $\pm$ 2	1193 $\pm$ 4
	298.15	1038 $\pm$ 3	1065 $\pm$ 2	1096 $\pm$ 2	1122 $\pm$ 2	1158 $\pm$ 2	1191 $\pm$ 10
	308.15	1033 $\pm$ 5	1061 $\pm$ 6	1090 $\pm$ 6	1119 $\pm$ 8	1154 $\pm$ 7	1189 $\pm$ 7
	313.15	1027 $\pm$ 2	1056 $\pm$ 7	1086 $\pm$ 6	1117 $\pm$ 1	1152 $\pm$ 2	1191 $\pm$ 6
	318.15	1026 $\pm$ 4	1057 $\pm$ 3	1083 $\pm$ 1	1118 $\pm$ 4	1152 $\pm$ 5	1185 $\pm$ 7
	323.15	1020 $\pm$ 3	1051 $\pm$ 3	1083 $\pm$ 2	1114 $\pm$ 10	1151 $\pm$ 4	1187 $\pm$ 9
	328.15	1018 $\pm$ 14	1049 $\pm$ 3	1080 $\pm$ 3	1110 $\pm$ 1	1147 $\pm$ 1	1186 $\pm$ 7
	333.15	1007 $\pm$ 1	1044 $\pm$ 3	1076 $\pm$ 8	1110 $\pm$ 8	1145 $\pm$ 2	1183 $\pm$ 9

338.15	1007 ± 3	1038 ± 3	1070 ± 2	1105 ± 3	1142 ± 3	1175 ± 8
343.15	1001 ± 1	1035 ± 3	1070 ± 1	1104 ± 2	1141 ± 1	1178 ± 3
353.15	988 ± 1	1026 ± 1	1063 ± 2	1099 ± 2	1134 ± 3	1170 ± 8
358.15	980 ± 5	1019 ± 1	1057 ± 6	1094 ± 1	1131 ± 1	1162 ± 2

As seen as slightly higher density values were obtained for fructose solutions under similar conditions, it is advisable that industries design their equipment based on these data so they can handle different carbohydrate solutions appropriately. On the other hand, the density of the solutions should be adequately analyzed to avoid higher values in comparison with the food products subjected to osmotic dehydration processes. In this situation, mass transfer is hindered as a consequence of the food floating and its partial exposure to the external medium instead of the complete immersion into the sugar solution (RAMYA; JAIN, 2017). Because denser fluids tend to require more energy for pumping and stirring, finding optimized conditions to compensate energetic expenses with the improved kinetics is necessary.

The experimental data of sucrose, glucose and fructose solutions were very similar (maximum deviation of 3%) to that observed by Darros-Barbosa, Balaban and Teixeira (2003) for sucrose, glucose and fructose solutions at equivalent solute concentration and temperature. It evidenced the reliability of the method to obtain results in wider ranges of solute content and temperature of those reported by the authors. Similar results were also reported by Jagannadha Rao, Madhusweta Das and Das (2009) for density of other products such as sugarcane, palm heart and date palm juices.

The graphical representation of the density values gives a picture about their behavior when temperature and solute concentration changed. Figure 5.2a-c showed that density values increased as the solute concentration increased for all the solutions, indicating that higher mass occupied the same volume as the carbohydrates are added to the solutions. The increase in density values with increasing carbohydrate concentration was probably due to the partial replacement of water by carbohydrate molecules. The carbohydrate presented a greater positive contribution to the density of the solution compared to the water molecules.

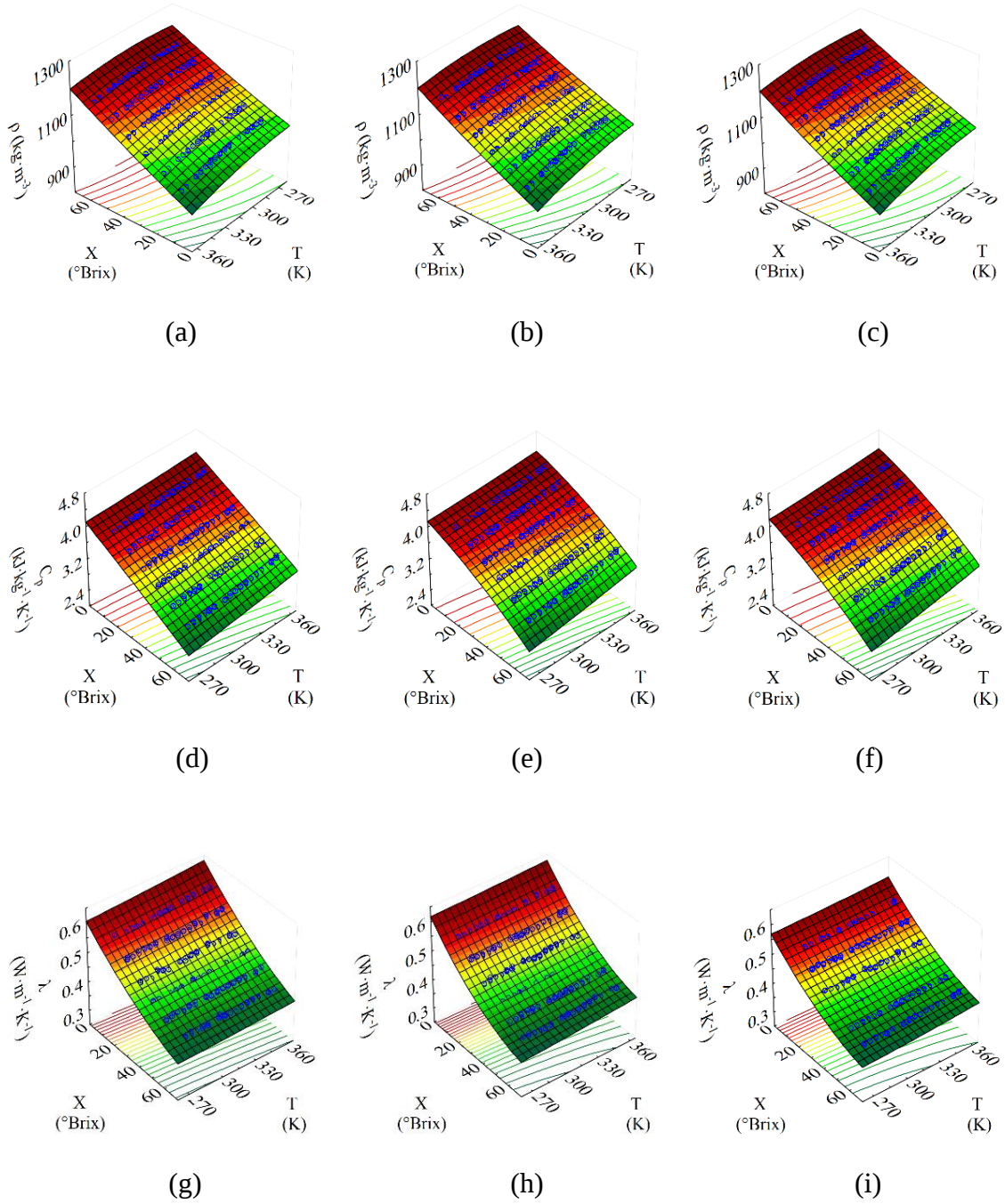


Figure 5.2. Density (ρ), specific heat (c_p) and thermal conductivity (λ) for (a, d, g) sucrose, (b, e, h) glucose and (c, f, i) fructose solutions as functions of solute concentration (°Brix) and temperature (K).

On the other hand, the same Figure (5.2a-c) showed that density was inversely proportional to the temperature: it increased as the temperature decreased. The same behavior is observed for different products, such as grape juice Merlot (CASTILHOS et al., 2018), meat extract (POLACHINI et al., 2016), Malay Rose apple pulp (FONTAN et al., 2018), juices and syrups from a non-centrifugal sugar cane production process

(ALARCÓN et al., 2020) and *Hancornia speciosa* G. (“mangaba”), *Annona muricata* L. (“graviola”) and *Eugenia uniflora* Berg (“pitanga”) pulps (VARELA et al., 2017). The decrease in density values as the temperature increased may be related to the agitation level of the molecules. Increasing the temperature makes the molecules in solution to move away from each other, causing the volume expansion – thus, decreasing density (POLACHINI et al., 2016).

5.3.2. Specific heat (c_p)

The means and standard deviations of the measurements obtained in triplicate for the specific heat of the sucrose, glucose and fructose solutions were calculated. They are shown in Table 5.3 for the whole range of solute concentrations and temperatures. The experimental data ranged from 2.89 to 4.09 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 3.03 to 4.20 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and from 3.06 to 4.24 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ for sucrose, glucose and fructose, respectively. Thus, fructose solutions require a slightly greater amount of energy to increase its temperature, followed by glucose and sucrose.

Table 5.3. Means and standard deviation for the specific heat of sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.

Carbohydrate	Temperature (K)	Solute concentration (°Brix)					
		10	20	30	40	50	60
		Specific heat (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)					
Sucrose	273.15	3.88 ± 0.04	3.68 ± 0.02	3.52 ± 0.00	3.35 ± 0.04	3.13 ± 0.01	2.89 ± 0.01
	278.15	3.92 ± 0.01	3.71 ± 0.04	3.56 ± 0.05	3.39 ± 0.04	3.12 ± 0.03	2.91 ± 0.02
	283.15	3.94 ± 0.03	3.72 ± 0.07	3.57 ± 0.04	3.39 ± 0.05	3.16 ± 0.03	2.93 ± 0.03
	288.15	3.96 ± 0.05	3.71 ± 0.04	3.58 ± 0.02	3.40 ± 0.04	3.18 ± 0.02	2.93 ± 0.03
	293.15	3.97 ± 0.03	3.72 ± 0.03	3.59 ± 0.04	3.42 ± 0.01	3.19 ± 0.03	2.95 ± 0.02
	298.15	3.99 ± 0.05	3.76 ± 0.05	3.58 ± 0.04	3.42 ± 0.04	3.19 ± 0.02	2.96 ± 0.01
	308.15	3.98 ± 0.01	3.78 ± 0.01	3.61 ± 0.01	3.41 ± 0.01	3.20 ± 0.08	2.97 ± 0.01
	313.15	4.00 ± 0.02	3.76 ± 0.01	3.61 ± 0.04	3.44 ± 0.04	3.22 ± 0.06	2.99 ± 0.04
	318.15	4.01 ± 0.05	3.78 ± 0.04	3.61 ± 0.01	3.44 ± 0.05	3.24 ± 0.01	3.02 ± 0.00
	323.15	4.02 ± 0.06	3.79 ± 0.04	3.63 ± 0.03	3.46 ± 0.04	3.25 ± 0.06	3.05 ± 0.01
	328.15	4.05 ± 0.02	3.81 ± 0.05	3.64 ± 0.05	3.46 ± 0.01	3.27 ± 0.01	3.06 ± 0.03
	333.15	4.05 ± 0.05	3.81 ± 0.03	3.65 ± 0.02	3.49 ± 0.02	3.29 ± 0.04	3.09 ± 0.01
	338.15	4.08 ± 0.01	3.83 ± 0.04	3.66 ± 0.01	3.51 ± 0.05	3.31 ± 0.01	3.12 ± 0.01
	343.15	4.08 ± 0.02	3.80 ± 0.05	3.67 ± 0.01	3.51 ± 0.04	3.33 ± 0.01	3.14 ± 0.01
	353.15	4.07 ± 0.02	3.83 ± 0.04	3.67 ± 0.03	3.54 ± 0.02	3.36 ± 0.01	3.19 ± 0.02
358.15	4.09 ± 0.05	3.84 ± 0.01	3.70 ± 0.01	3.54 ± 0.02	3.37 ± 0.01	3.22 ± 0.04	
Glucose	273.15	3.98 ± 0.06	3.85 ± 0.03	3.70 ± 0.04	3.51 ± 0.06	3.29 ± 0.03	3.03 ± 0.02
	278.15	4.00 ± 0.00	3.87 ± 0.00	3.72 ± 0.01	3.53 ± 0.01	3.30 ± 0.05	3.04 ± 0.01
	283.15	4.02 ± 0.01	3.87 ± 0.00	3.72 ± 0.01	3.54 ± 0.03	3.30 ± 0.03	3.05 ± 0.02
	288.15	4.03 ± 0.02	3.89 ± 0.05	3.73 ± 0.01	3.55 ± 0.01	3.31 ± 0.01	3.06 ± 0.01
	293.15	4.05 ± 0.01	3.91 ± 0.05	3.74 ± 0.01	3.56 ± 0.02	3.33 ± 0.02	3.08 ± 0.02
	298.15	4.06 ± 0.02	3.91 ± 0.02	3.75 ± 0.04	3.57 ± 0.01	3.34 ± 0.03	3.09 ± 0.01
	308.15	4.09 ± 0.04	3.94 ± 0.01	3.77 ± 0.02	3.60 ± 0.05	3.36 ± 0.05	3.13 ± 0.04
	313.15	4.10 ± 0.04	3.96 ± 0.05	3.78 ± 0.04	3.60 ± 0.04	3.37 ± 0.05	3.14 ± 0.05
	318.15	4.11 ± 0.07	3.96 ± 0.03	3.80 ± 0.04	3.61 ± 0.06	3.40 ± 0.03	3.17 ± 0.02
	323.15	4.12 ± 0.04	3.97 ± 0.02	3.81 ± 0.03	3.63 ± 0.03	3.41 ± 0.02	3.19 ± 0.01
	328.15	4.14 ± 0.01	3.98 ± 0.01	3.81 ± 0.02	3.64 ± 0.04	3.43 ± 0.02	3.21 ± 0.02
	333.15	4.14 ± 0.05	3.99 ± 0.03	3.82 ± 0.03	3.65 ± 0.01	3.44 ± 0.03	3.24 ± 0.01
	338.15	4.16 ± 0.01	4.00 ± 0.01	3.84 ± 0.03	3.66 ± 0.01	3.47 ± 0.01	3.26 ± 0.01
	343.15	4.17 ± 0.03	4.01 ± 0.08	3.85 ± 0.02	3.69 ± 0.03	3.48 ± 0.02	3.29 ± 0.03
	353.15	4.19 ± 0.06	4.02 ± 0.04	3.86 ± 0.04	3.70 ± 0.04	3.52 ± 0.04	3.34 ± 0.05

	358.15	4.20 ± 0.07	4.03 ± 0.07	3.87 ± 0.03	3.72 ± 0.04	3.54 ± 0.06	3.38 ± 0.03
	273.15	4.02 ± 0.07	3.90 ± 0.02	3.73 ± 0.05	3.56 ± 0.03	3.32 ± 0.02	3.06 ± 0.01
	278.15	4.04 ± 0.01	3.90 ± 0.04	3.75 ± 0.04	3.55 ± 0.01	3.31 ± 0.08	3.07 ± 0.01
	283.15	4.06 ± 0.01	3.91 ± 0.02	3.76 ± 0.01	3.57 ± 0.01	3.34 ± 0.01	3.08 ± 0.01
	288.15	4.07 ± 0.01	3.93 ± 0.02	3.77 ± 0.01	3.59 ± 0.01	3.34 ± 0.01	3.08 ± 0.01
	293.15	4.09 ± 0.01	3.93 ± 0.04	3.77 ± 0.03	3.60 ± 0.04	3.37 ± 0.01	3.10 ± 0.01
	298.15	4.10 ± 0.01	3.95 ± 0.00	3.78 ± 0.02	3.60 ± 0.01	3.37 ± 0.01	3.12 ± 0.05
	308.15	4.12 ± 0.06	3.98 ± 0.03	3.81 ± 0.04	3.62 ± 0.07	3.40 ± 0.04	3.15 ± 0.04
Fructose	313.15	4.14 ± 0.03	3.98 ± 0.04	3.82 ± 0.05	3.64 ± 0.02	3.41 ± 0.03	3.18 ± 0.05
	318.15	4.16 ± 0.06	4.00 ± 0.03	3.83 ± 0.03	3.65 ± 0.04	3.43 ± 0.02	3.20 ± 0.03
	323.15	4.17 ± 0.03	4.01 ± 0.02	3.84 ± 0.02	3.66 ± 0.05	3.44 ± 0.02	3.22 ± 0.03
	328.15	4.17 ± 0.10	4.02 ± 0.01	3.85 ± 0.02	3.67 ± 0.04	3.46 ± 0.02	3.24 ± 0.03
	333.15	4.19 ± 0.03	4.03 ± 0.04	3.87 ± 0.06	3.69 ± 0.05	3.48 ± 0.02	3.27 ± 0.05
	338.15	4.19 ± 0.02	4.04 ± 0.01	3.87 ± 0.02	3.69 ± 0.00	3.49 ± 0.01	3.29 ± 0.03
	343.15	4.20 ± 0.01	4.04 ± 0.06	3.89 ± 0.01	3.72 ± 0.01	3.52 ± 0.00	3.31 ± 0.01
	353.15	4.22 ± 0.05	4.07 ± 0.04	3.89 ± 0.05	3.74 ± 0.03	3.55 ± 0.02	3.38 ± 0.06
	358.15	4.24 ± 0.04	4.07 ± 0.04	3.92 ± 0.03	3.76 ± 0.03	3.58 ± 0.03	3.41 ± 0.02

The values showed an inverse behavior compared to that of density, decreasing the specific heat as the solute concentration increased. Such trend could be better seen in Figure 5.2d-f. Lower carbohydrate concentrations make the specific heat to increase mainly due to the higher specific heat capacity of pure water when compared to carbohydrates (COSTA et al., 2018).

Regarding the temperature, Figure 5.2d-f also showed that specific heat slightly increases with increasing temperature. This same trend was noticed for Cabernet Sauvignon grape juice (CASTILHOS et al., 2017), Merlot grape juice (CASTILHOS et al., 2018), juices and syrups from a non-centrifugal sugar cane production process (ALARCÓN et al., 2020), meat extract (POLACHINI et al., 2017), pequi pulp (SOUZA et al., 2016) and papaya puree (TANSAKUL et al., 2012). So, it could be assumed that diluted solutions demand more energy to increase the temperature than concentrated solutions with the same mass. This required energy tends to increase slightly as the solution temperature increases over a given process. Although the previously cited studies presented close values at similar solute concentrations and temperatures, the distinct compositions make them to differ among each other – highlighting the need to determine the properties for each product specifically. These studies also employed the differential scanning calorimetry technique, reinforcing its efficiency and reliability for detecting small variations in energy without any specific requirements for sample preparation (PARNIAKOVA et al., 2018).

5.3.3. Thermal conductivity (λ)

The mean values and standard deviations for thermal conductivity of the sucrose, glucose and fructose solutions were obtained as shown in Table 5.4. The data

ranged from 0.43 to 0.59 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 0.39 to 0.58 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and from 0.39 to 0.54 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ for sucrose, glucose and fructose, respectively.

Table 5.4. Means and standard deviation for the thermal conductivity of sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.

Carbohydrate	Temperature (K)	Solute concentration (°Brix)					
		10	20	30	40	50	60
		Thermal Conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)					
Sucrose	273.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.43 ± 0.00
	278.15	0.56 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.43 ± 0.01	0.43 ± 0.01
	283.15	0.56 ± 0.00	0.53 ± 0.01	0.48 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	288.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.43 ± 0.00
	293.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	298.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.01	0.44 ± 0.01
	308.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.01	0.49 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	313.15	0.58 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.01	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.43 ± 0.00
	318.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	323.15	0.58 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	328.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.01	0.48 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	333.15	0.58 ± 0.00	0.54 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	338.15	0.58 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	343.15	0.59 ± 0.00	0.55 ± 0.01	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	353.15	0.59 ± 0.00	0.54 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	358.15	0.59 ± 0.00	0.54 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.45 ± 0.00
Glucose	273.15	0.56 ± 0.00	0.52 ± 0.01	0.47 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.01
	278.15	0.56 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.01
	283.15	0.56 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.01	0.42 ± 0.01	0.39 ± 0.00
	288.15	0.57 ± 0.00	0.52 ± 0.01	0.47 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.01	0.39 ± 0.00
	293.15	0.57 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	298.15	0.57 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.01	0.42 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	308.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.01	0.49 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.39 ± 0.01
	313.15	0.56 ± 0.00	0.52 ± 0.01	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	318.15	0.56 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	323.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	328.15	0.56 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.48 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	333.15	0.57 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	338.15	0.56 ± 0.00	0.53 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.41 ± 0.00
	343.15	0.58 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.49 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.43 ± 0.01	0.40 ± 0.00
	353.15	0.57 ± 0.00	0.53 ± 0.01	0.49 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.40 ± 0.01
	358.15	0.58 ± 0.00	0.53 ± 0.01	0.48 ± 0.00	0.45 ± 0.01	0.43 ± 0.01	0.41 ± 0.00
Fructose	273.15	0.52 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	278.15	0.52 ± 0.01	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	283.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.45 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	288.15	0.52 ± 0.00	0.50 ± 0.01	0.46 ± 0.00	0.42 ± 0.01	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	293.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	298.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	308.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	313.15	0.52 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	318.15	0.53 ± 0.01	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	323.15	0.53 ± 0.01	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.39 ± 0.00
	328.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.41 ± 0.01	0.40 ± 0.00
	333.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	338.15	0.53 ± 0.00	0.50 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	343.15	0.53 ± 0.00	0.51 ± 0.01	0.46 ± 0.00	0.43 ± 0.01	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	353.15	0.53 ± 0.00	0.51 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.43 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00
	358.15	0.54 ± 0.00	0.51 ± 0.00	0.47 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.40 ± 0.00

Slightly higher values were observed for sucrose, followed by glucose and fructose. It means that osmotic solutions composed by sucrose conduct thermal energy better than fructose, for example. In other words, the steady-state of heat transfer in osmotic dehydration processes can be more easily established for solutions with higher

thermal conductivity. Such temperature control is desired since changes may occur due to changes in the room temperature or even as a consequence of the presence of assisting technologies as ultrasound (NOWACKA et al., 2017).

In general, the experimental values increased with increasing temperature and decreasing solute concentration (Figure 5.1.2g-i). Muramatsu, Tagawa and Kasai (2005) reported similar behavior for thermal conductivity of fructose solutions at conditions close to the ones determined in the present study. These authors also reported higher values for pure water in comparison with fructose solutions, indicating that fructose acted as a barrier to thermal conduction similarly as found for the other carbohydrate solutions. The differences among the carbohydrate solutions may be due to their own composition and structure that facilitates or raise difficulties to the heat transfer. Such differences can be seen not only among the carbohydrate solutions but also in other food products (JAGANNADHA RAO et al., 2009; TANSAKUL et al., 2012; COSTA et al., 2018), which showed close thermal conductivity values at similar conditions with slight differences related to the composition.

5.3.4. Prandtl number (*Pr*)

Making use of the experimental data of viscosity (Telis et al., 2007), showed in Table 5.S1 from the supplementary file, and the presented data for specific heat and thermal conductivity, the Prandtl number (*Pr*) could be calculated. Comparing *Pr* in a same range of temperature (308.15 and 358.15 K) and solute concentration (10 to 60 °Brix), it was obtained: from 1.96 to 193.93 for sucrose solutions, 2.03 to 130.36 for glucose solutions and from 2.03 to 119.34 for fructose solutions (Table 5.5).

Table 5.5. Calculated Prandtl numbers for sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentrations and temperatures.

Carbohydrate	Temperature (K)	Solute concentration (°Brix)					
		10	20	30	40	50	60
		Prandtl Number (dimensionless)					
Sucrose	273.15	13.46	26.57	45.95	109.07	296.31	1532.70
	278.15	12.44	22.25	37.50	86.36	217.83	1091.44
	283.15	11.26	18.86	34.33	74.62	196.73	843.36
	288.15	9.83	15.78	27.28	56.32	140.96	561.20
	293.15	8.85	13.71	23.63	46.57	109.84	420.06
	298.15	7.95	11.97	19.81	38.79	84.28	325.80
	308.15	6.24	9.60	15.25	28.07	63.37	193.93
	313.15	5.69	8.54	13.29	16.89	47.06	158.65
	318.15	5.17	7.59	11.07	21.46	37.18	131.49

	323.15	4.61	7.00	10.02	18.99	35.30	108.92
	328.15	4.09	6.42	9.08	16.80	26.40	88.56
	333.15	3.62	5.74	7.71	15.15	22.17	75.05
	338.15	3.15	5.35	6.79	13.35	18.10	63.76
	343.15	2.93	4.80	6.30	12.44	17.70	55.29
	353.15	2.23	4.18	5.01	10.10	11.57	42.61
	358.15	1.96	3.88	4.44	9.27	9.82	38.21
Glucose	273.15	13.83	27.89	46.59	104.35	***	***
	278.15	12.03	23.20	37.47	81.50	***	***
	283.15	12.64	20.01	33.81	70.02	***	***
	288.15	9.91	16.83	27.90	53.07	***	***
	293.15	8.89	14.62	23.52	44.04	***	***
	298.15	7.66	12.58	19.45	36.60	70.12	***
	308.15	7.09	9.99	15.10	27.11	52.86	130.36
	313.15	5.93	8.97	13.27	16.02	39.18	103.25
	318.15	5.19	7.97	11.41	20.21	31.63	84.96
	323.15	5.25	7.32	10.36	17.99	29.70	69.34
	328.15	4.20	6.69	8.90	15.89	22.01	57.55
	333.15	3.70	6.11	7.88	14.16	18.64	48.78
	338.15	3.18	5.58	6.79	12.71	15.04	40.80
	343.15	3.31	5.29	6.40	11.70	14.92	36.07
	353.15	2.26	4.38	5.02	9.63	9.40	27.67
	358.15	2.03	4.09	4.43	8.80	8.11	24.22
Fructose	273.15	14.49	27.96	43.40	101.16	231.21	904.98
	278.15	12.32	22.91	34.53	78.49	171.77	654.15
	283.15	12.90	19.83	36.04	67.70	157.50	500.53
	288.15	10.41	16.66	26.51	51.39	108.88	332.75
	293.15	9.12	14.61	22.41	42.58	86.54	252.71
	298.15	7.95	12.67	17.66	35.30	65.89	193.95
	308.15	7.21	10.12	15.88	26.18	49.63	119.34
	313.15	6.12	8.86	12.56	15.63	37.42	95.63
	318.15	5.26	7.93	10.37	19.62	30.34	77.21
	323.15	5.42	7.36	10.69	17.45	28.35	64.37
	328.15	4.24	6.66	8.52	15.41	20.74	52.93
	333.15	3.78	6.10	7.61	13.82	17.70	45.13
	338.15	3.23	5.62	6.25	12.27	14.12	38.00
	343.15	3.50	5.19	6.87	11.39	14.41	33.59
	353.15	2.40	4.39	4.72	9.33	8.77	25.31
	358.15	2.03	4.09	4.25	8.56	7.50	22.10

***viscosity data not available in literature.

In general, sucrose solutions presented slightly higher Pr values – being in agreement with the trends observed for viscosity (TELIS et al., 2007). The rise provoked in Pr occurred even though sucrose solutions had slightly higher λ and slightly lower c_p . It means that Prandtl number of the carbohydrate solutions was more governed by the transport properties than by thermal ones.

The determination of Pr is useful for measuring not only the relative effectiveness of momentum and heat transport but also to provide a measurement of the diffusion through the velocity and thermal boundary layers involved in osmotic dehydration (HUBBARD; FARKAS, 2000). Physically, higher Prandtl number corresponds to more viscous fluids with reduced velocity profile during a given flow

(HAYAT et al., 2016). Once the carbohydrate solutions showed Prandtl numbers higher than 1 at the studied conditions, it can be stated that momentum boundary layer is more significant than thermals – i.e., heat propagates more easily through the solutions than momentum.

In spite of such differences, Pr can be modified to facilitate one phenomena or other. Decreasing temperature of the solutions and increasing solute concentration promoted a rise in Pr values for all of the solutions (Figure 5.3a-c), which follows a similar trend as observed for density and viscosity. Sahu, Chhabra and Eswaran (2009) and Hayat et al. (2016) related the increased Prandtl number with the thinning of the thermal boundary layer and the enhancement of the heat transfer in fluids at all Reynolds numbers.

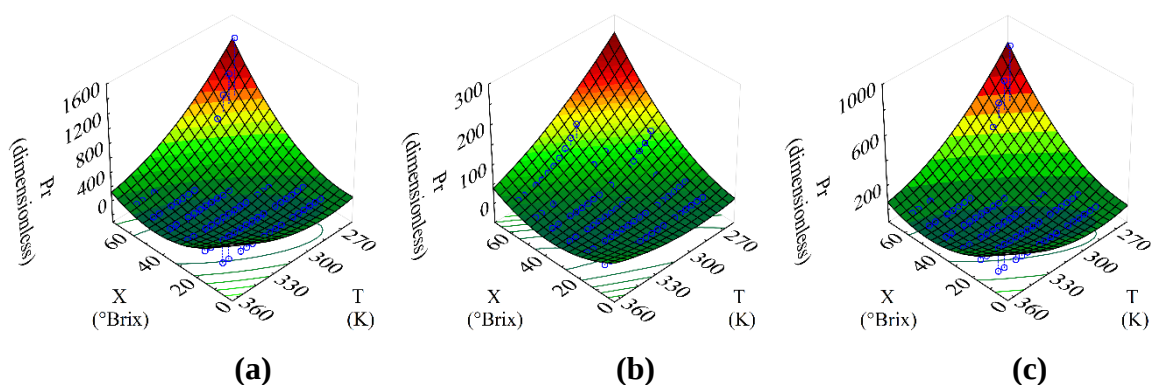


Figure 5.3. Prandtl number (Pr) for (a) sucrose, (b) glucose and (c) fructose solutions as functions of solute concentration ($^{\circ}\text{Brix}$) and temperature (K).

5.3.5. Mathematical modeling

The mathematical modeling of the thermophysical properties provide versatile equations for ready-to-use approaches related to food processes design. In this way, the proposed models in Table 5.1 were fitted to the experimental data for the studied properties. Table 5.6 shows the fitting parameters, including determination coefficients (R^2) and the mean relative error (MRE) for each model and each solution studied.

Table 5.6. Fitting parameters of the proposed models for density, specific heat and thermal conductivity.

Property	Carbohydrate	Parameters	Eq. (5.7)	Eq. (5.8)	Eq. (5.9)	Eq. (5.10)
ρ	Sucrose	a	869.56	728.62	2116.85	713.40
		b	338.01	338.11	2.95×10^{-3}	0.35
		c	2.95×10^{-3}	8.24×10^{-2}	-0.13	5.50×10^{-3}
		d	-	-	-	2.54
		e	-	-	-	-5.20×10^{-3}

c_p	Glucose	f	-	-	-	8.00×10^{-3}
		R^2	0.9861	0.9251	0.9872	0.9968
		MRE (%)	0.42	1.24	1.24	0.30
		a	870.53	729.09	2118.95	723.57
		b	338.01	338.15	2.96×10^{-3}	0.41
		c	2.96×10^{-3}	8.26×10^{-2}	-0.13	5.70×10^{-3}
		d	-	-	-	2.48
		e	-	-	-	-5.10×10^{-3}
		f	-	-	-	7.80×10^{-3}
		R^2	0.9790	0.9183	0.9801	0.9892
		MRE (%)	0.43	1.24	1.24	1.20
	Fructose	a	872.27	730.55	2097.02	708.89
		b	333.22	333.33	2.96×10^{-3}	0.37
		c	2.96×10^{-3}	8.26×10^{-2}	-0.13	5.80×10^{-3}
		d	-	-	-	2.57
		e	-	-	-	-5.30×10^{-3}
		f	-	-	-	7.90×10^{-3}
		R^2	0.9829	0.9217	0.9840	0.9934
		MRE (%)	0.44	1.25	0.40	0.32
	Sucrose	a	5.21	6.97	1.28	3.78
		b	-538.54	-541.98	-5.39×10^{-3}	-2.90×10^{-2}
		c	-5.39×10^{-3}	-0.14	0.21	-
		d	-	-	-	1.29×10^{-3}
		e	-	-	-	-
		f	-	-	-	3.20×10^{-5}
		R^2	0.9813	0.9073	0.9815	0.9875
		MRE (%)	0.85	2.52	1.29	0.60
	Glucose	a	5.44	7.08	1.21	3.71
		b	-577.38	-580.76	-5.01×10^{-3}	-2.07×10^{-2}
		c	-5.01×10^{-3}	-0.13	0.22	-1.07×10^{-4}
		d	-	-	-	1.61×10^{-3}
		e	-	-	-	-
		f	-	-	-	3.10×10^{-5}
		R^2	0.9729	0.8647	0.9732	0.9905
		MRE (%)	1.07	2.96	1.81	0.36
	Fructose	a	5.50	7.16	1.20	3.75
		b	-584.12	-587.31	-5.01×10^{-3}	-2.11×10^{-2}
		c	-5.01×10^{-3}	-0.13	0.23	-1.09×10^{-4}
		d	-	-	-	1.62×10^{-3}
		e	-	-	-	-
		f	-	-	-	3.20×10^{-5}
		R^2	0.9730	0.8646	0.9733	0.9910
		MRE (%)	1.08	2.96	2.46	0.36
λ	Sucrose	a	0.69	1.01	0.30	0.56
		b	-315.23	-316.67	-7.04×10^{-3}	-4.75×10^{-3}
		c	-7.04×10^{-3}	-0.18	0.12	2.00×10^{-5}
		d	-	-	-	1.88×10^{-4}
		e	-	-	-	-
		f	-	-	-	-
		R^2	0.9866	0.9428	0.9867	0.9876
		MRE (%)	1.09	2.38	1.09	1.06
	Glucose	a	0.68	1.01	0.32	0.58
		b	-285.70	-287.09	-7.38×10^{-3}	-6.25×10^{-3}
		c	-7.38×10^{-3}	-0.19	0.11	3.40×10^{-5}
		d	-	-	-	1.22×10^{-4}
		e	-	-	-	-
		f	-	-	-	1.00×10^{-6}
		R^2	0.9846	0.9573	0.9847	0.9930

	<i>MRE (%)</i>	1.24	2.08	1.24	1.18
Fructose	<i>a</i>	0.62	0.88	0.31	0.53
	<i>b</i>	-271.33	-272.47	-6.22×10^{-3}	-4.51×10^{-3}
	<i>c</i>	-6.22×10^{-3}	-0.16	0.11	2.40×10^{-5}
	<i>d</i>	-	-	-	1.57×10^{-4}
	<i>e</i>	-	-	-	-
	<i>f</i>	-	-	-	-
	R^2	0.9792	0.9412	0.9793	0.9863
	<i>MRE (%)</i>	1.24	2.09	1.24	0.98

In general, all models studied presented good predictability of the experimental data, with determination coefficients higher than 0.9183 for density, 0.8646 for specific heat and 0.9412 for thermal conductivity. Similarly, the maximum mean relative error values for density, specific heat and thermal conductivity were, respectively, 1.25%, 2.96% and 2.38%.

Among the Equations (5.7)-(5.10), the Equation (5.10) presented the best model for predicting density ($R^2 \geq 0.9892$ and $MRE \leq 1.20\%$), specific heat ($R^2 \geq 0.9875$ and $MRE \leq 0.60\%$) and thermal conductivity ($R^2 \geq 0.9863$ and $MRE \leq 1.18\%$) for all solutions. Similar generic model was used to fit experimental thermophysical properties of different food products with good accuracy (ALARCÓN et al., 2020; FONTAN et al., 2018; COSTA et al., 2018).

By presenting a good fitting accuracy, the Equation (5.7) can be useful for estimating the temperature dependence by a given property due to the physical meaning of the fitting parameters. The *b* value represents the activation energy ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), where the higher the *b* modulus the higher is the variation in a given property when temperature changes. Thus, fructose is more affected by temperature than the other carbohydrate solutions regarding density and specific heat. Sucrose, on the other hand, is more sensitive to temperature changes in what concerns the thermal conductivity.

5.4. Conclusion

Thermophysical properties of sucrose, glucose and fructose solutions were experimentally determined in a wide range of temperature and solute concentration. Fructose solutions presented slightly higher density and specific heat capacity, while the higher values for thermal conductivity were found for sucrose. All of the proposed models were well-fitted to the experimental data, although the empirical model based on the significant variables had the best fit. Such models are useful for designing food

processes involving heat, mass and momentum transfer, such as the ones related to osmotic dehydration.

The dimensionless analysis between transport and thermal properties resulted in Prandtl numbers higher than the unit. It gave insights that thermal boundary layer was thinner than velocity boundary layer for sucrose solutions, followed by glucose and fructose. Moreover, heat transfer can be favored when compared to momentum transfer when solutions had higher Prandtl numbers – conditions obtained at lower temperatures and higher solute concentrations.

5.5. Acknowledgments

The authors acknowledge the Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel – CAPES (Grants Code 001 and 88887.468140/2019-00) for the financial support.

Ethical Guidelines

Ethics approval was not required for this research.

Data Availability

The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions.

Conflict of Interest

The authors have no conflict of interest to declare.

5.6. References

- ALARCÓN, A. L.; ORJUELA, A.; NARVAÉZ, P. C.; CAMACHO, E. C. Thermal and Rheological Properties of Juices and Syrups during Non-centrifugal Sugar Cane (Jaggery) Production. **Food and Bioproducts Processing**, v. 121, p. 76–90, 2020.
- ALI, A., BIDHURI, P.; MALIK, N. A.; UZAIR, S. Density, viscosity, and refractive index of mono-, di-, and tri-saccharides in aqueous glycine solutions at different temperatures. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, p. 1878–5352, 2014.

AMAMI, E.; KHEZAMI, W.; MEZRIGUI, S.; BADWAIK, L. S.; BEJAR, A. K.; PEREZ, C. T.; KECHAOU, N. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 36, p. 286–300, 2017.

ARCHER, D. G. Thermodynamic properties of synthetic sapphire (a-A1203) standard reference material 720 and the effect of temperature-scale differences on thermodynamic properties. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 22, p. 1441–1453, 1993.

ASSIS, F. R.; MORAIS, R. M. S. C.; MORAIS, A. M. M. B. Mathematical modelling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 3, p. 1-16, 2016.

ASTM. **American society for testing and materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005.

BARMAN, N.; BADWAIK, L. S. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (*Averrhoa carambola* L.) slices during osmotic dehydration. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 37–44, 2017.

BARREIROS, R. C.; BOSSOLAN, B.; TRINDADE, C. E. P. Fructose in humans: metabolic effects, clinical utilization, and associated inherent errors. **Revista de Nutrição**, v. 18, p. 377–389, 2005.

BOZKIR, H.; ERGUN, A. R.; SERDAR, E.; METIN, G.; BAYSAL, T. Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 54, p. 135–141, 2019.

CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; CARVALHO, G. R.; TELIS- ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. **Food Research International**, v. 100, p. 724–730, 2017.

CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; CARVALHO, G. R.; TELIS- ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. **Journal of Food Research International**, v. 105, p. 905–912, 2018.

COSTA, H. C. B.; SILVA, D. O. S.; VIEIRA L. G. M. V. A numerical and experimental analysis of the methodology of thermal conductivity measurements in fluids by concentric cylinders, **Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 669–683, 2019.

COSTA, H. C. B.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Physical properties of açai-berry pulp and kinetics study of its anthocyanin thermal degradation. **Journal of Food Engineering**, v. 239, p. 104–113, 2018.

DARROS-BARBOSA, R.; BALABAN, M. O.; TEIXEIRA, A. A. Temperature and Concentration Dependence of Density of Model Liquid Foods. **International Journal of Food Properties**, v. 6, p. 195–214, 2003.

DEHGHANNYA, J.; HOSSEINLAR, S.-H.; HESHMATI, M. K. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 45, p. 132–151, 2018.

DICKERSON, R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, v. 19, p. 198–204, 1965.

FIGUEROA, L. E.; GENOVESE, D. B. Fruit jellies enriched with dietary fibre: Development and characterization of a novel functional food product. **LWT - Food Science Technology**, v. 111, p. 423–428, 2019.

FONTAN, R. C. I.; SAMPAIO, V. S.; SOUZA JR, E. C.; PEREIRA, R. G.; RODRIGUES, L. B.; GONÇALVES, G. R. F.; GANDOLFI, O. R. R.; BONOMO, R. C. F. Composition and thermophysical properties of Malay Rose apple pulp. **International Food Research Journal**, v. 25, p. 1067–1073, 2018.

GARZA, S.; IBARZ, A. Effect of temperature and concentration on the density of clarified pineapple juice. **International Journal Food Properties**, v. 13, p. 913–920, 2010.

HAYAT, T.; KHAN, M. I.; FAROOQ, M.; ALSAEDI, A.; WAQAS, M.; YASMEEN, T. Impact of Cattaneo–Christov heat flux model in flow of variable thermal conductivity fluid over a variable thicked surface. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 99, p. 702–710, 2016.

- HAYAT, T.; KHAN, M. I.; FARROQ, M.; GULL, N.; ALSAEDI, A. Unsteady three-dimensional mixed convection flow with variable viscosity and thermal conductivity. **Journal of Molecular Liquids**, v. 223, p. 1297-1310, 2016.
- HEINONEN, J.; SANLAVILLE, Q.; NISKAKOSKI, H.; SAINIO, T. Effect of separation material particle size on pressure drop and process efficiency in continuous chromatographic separation of glucose and fructose. **Separation and Purification Technology**, v. 193, p. 317–326, 2018.
- HUBBARD, L. J.; FARKAS, B. E. Influence of oil temperature on convective heat transfer during immersion frying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 24, p. 143–162, 2000.
- JAGANNADHA RAO, P. V. K.; MADHUSWETA DAS; DAS S. K. Changes in physical and thermo-physical properties of sugarcane, palmyra-palm and date-palm juices at different concentration of sugar. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 559–566, 2009.
- KHAN, M. I. H.; CHANDAN KUMAR; JOARDDER, M. U. H.; KARIM, M. A. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. **Drying Technology**, v. 35, p. 335–346, 2017.
- KEIM, N. L.; STANHOPE, K. L.; HAVEL, P. J. Fructose and High-Fructose Corn Syrup. in: **Encyclopedia of Food and Health**, Amsterdã, NL: Elsevier, 2016.
- LEILA, A.; JEAN-YVES, M.; SID-AHMED, R.; THIERRY, M.; LUC, G.; STEPHANE C.; ZOULIKHA, M. R. Prediction of Thermal Conductivity and Specific Heat of Native Maize Starch and Comparison with HMT Treated Starch. **Journal of Renewable Materials**, v. 7, p. 535–546, 2019.
- MOULIK, S.; VADTHYA, P.; KALIPATNAPU, Y. R.; CHENNA, S.; SUNDERGOPAL, S. Production of fructose sugar from aqueous solutions: nanofiltration performance and hydrodynamic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 44–53, 2015.
- MURAMATSU, Y.; TAGAWA, A.; KASAI, T. Thermal Conductivity of Several Liquid Foods. **Food Science Technology**, v. 11, p. 288–294, 2005.
- NOWACKA, M.; FIJALKOWSKA, A.; WIKTOR, A.; RYBAK, K.; DADAN, M.; WITROWA-RAJCHERT, D. Changes of Mechanical and Thermal Properties of

Cranberries Subjected to Ultrasound Treatment. **International Journal of Food Engineering**, v. 13, n. 6, p. 1-9, 2017.

OLIVEIRA, L. F.; CORRÊA, J. L. G.; PEREIRA, M. C. A.; RAMOS, A. L. S.; VILELA, M. B. (2016). Osmotic dehydration of yacon (*Smallanthus sonchifolius*): Optimization for fructan retention. **LWT – Food Science and Technology**, v. 71, p. 77-87, 2016.

OSTROWSKA-LIGEŻA, E.; MARZEC, A.; GÓRSKA, A.; WIRKOWSKA-WOJDYŁA, M.; BRYŚ, J.; REJCH, A.; CZARKOWSKA, K. A comparative study of thermal and textural properties of milk, white and dark chocolates. **Thermochimica Acta**, v. 671, p. 60–69, 2019.

PARNIAKOVA, O.; BALSÁ, O.; BARBAB, F. J.; MYKHAILYKC, V.; LEOVKAA, N.; VOROBIEV, E. Application of differential scanning calorimetry to estimate quality and nutritional properties of food products. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 58, p. 362–385, 2018.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; BASTOS, M. G.; TELIS, V. R. N.; SOUZA, A. C.; TELIS-ROMERO, J. Density, Thermal Expansion Coefficient, and Rheological Behaviour of Meat Extract under Different Temperatures and Solids Concentrations. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 94, p. 988–994, 2016.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; BASTOS, M. G.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Boiling point and specific heat of meat extract. **International Journal of Food Properties**, v. 1(S2), p. S1392–S1402, 2017.

RAMYA, V.; JAIN N. K. A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: An integrated approach. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, e12440, p. 1–22, 2017.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K.; KNORR, D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science & Technology**, v. 13, p. 48–59, 2002.

RAVENTÓS, M.; HERNÁNDEZ, E.; AULEDA, J.; IBARZ, A. Concentration of aqueous sugar solutions in a multi-plate cryoconcentrator. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 577–585, 2007.

- RIBEIRO, E. F.; POLACHINI, T. C.; CARVALHO, G. R.; ROMERO, J. T.; CABRAL, R. A. F. Thermophysical properties of different olive oils: Evaluating density and rheology through a fluid dynamic approach. **European Journal of Lipid Science and technology**, v. 119, n. 7, p. 1–10, 2017.
- SAHU, A. K.; CHHABRA, R. P.; ESWARAN, V. Effects of Reynolds and Prandtl numbers on heat transfer from a square cylinder in the unsteady flow regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 839–850, 2009.
- SILVA, A. T. C. R.; MARTINEZ, K. C. L.; BRITO, A. B. N.; GIULIETTI, M. Separation of glucose and fructose by freezing crystallization. **Crystal Research and Technology**, v. 45, p. 1032–1034, 2010.
- SOUZA, E. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, J. E. A.; LEMOS, D. M. Thermophysical properties of the pequi pulp in different concentrations. **Bioscience Journal**, v. 32, p. 20–28, 2016.
- TANSAKUL, A.; KANTRONG, H.; SAENGRAYUP, R.; SURA, P. Thermophysical Properties of Papaya Puree, **International Journal of Food Properties**, v. 15, p. 1086–1100, 2012.
- TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J.; MAZZOTTI, H. B.; GABAS, A. L. Viscosity of Aqueous Carbohydrate Solutions at Different Temperatures and Concentrations. **International Journal of Food Properties**, 10, 185–195, 2007.
- VAN DER MAAREL, M. J. E. C.; VAN DER VEEN, B.; UITDEHAAG, J. C. M.; LEEMHUIS, H.; DIJKHUIZEN, L. Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family. **Journal of Biotechnology**, v. 94, p. 137–155, 2002.
- VARELA, M. S. DE S.; PITOMBEIRA, G. C. R.; SILVA, A. C. N.; PEREIRA, C. G. Determination and Modeling of Thermophysical and Transport Properties of Tropical Pulps. **European Journal of Biophysics**, v. 5, p. 79–88, 2017.
- WICHAMANEE, Y.; ACHARAPHAN, M.; SANTAD, W. Effect of dragon fruit oligosaccharide, stabilizer and sucrose on physical and sensory quality of ice cream. **International Food Research Journal**, v. 23, p. 269–276, 2016.

Table 5. S1. Dynamic viscosity for sucrose, glucose and fructose solutions at different solute concentration and temperatures (Telis et al., 2007).

Carbohydrate	Temperature (K)	Solute concentration ($\frac{g_{\text{solute}}}{100 g_{\text{solution}}}$)					
		10	20	30	40	50	60
		η (mPa.s) (Telis et al., 2007)					
Sucrose	273.15	1.98	3.80	6.30	14.77	40.44	206.08
	278.15	1.76	3.15	5.12	11.53	30.19	148.76
	283.15	1.61	2.68	4.58	9.88	27.02	114.37
	288.15	1.41	2.26	3.77	7.47	19.02	74.98
	293.15	1.26	1.96	3.21	6.20	15.04	56.76
	298.15	1.13	1.70	2.65	5.17	11.49	43.88
	308.15	0.89	1.35	2.07	3.80	8.69	26.67
	313.15	0.82	1.20	1.79	2.25	6.35	21.32
	318.15	0.74	1.06	1.51	2.84	5.04	17.20
	323.15	0.66	0.98	1.36	2.52	4.78	14.07
	328.15	0.57	0.89	1.20	2.22	3.56	11.72
	333.15	0.52	0.81	1.06	1.98	2.98	9.88
	338.15	0.45	0.74	0.92	1.77	2.42	8.35
	343.15	0.42	0.69	0.85	1.62	2.34	7.20
	353.15	0.32	0.59	0.68	1.33	1.52	5.43
	358.15	0.28	0.55	0.59	1.22	1.31	4.75
Glucose	273.15	1.95	3.77	5.91	12.85	-	-
	278.15	1.68	3.11	4.80	10.01	-	-
	283.15	1.77	2.66	4.32	8.62	-	-
	288.15	1.39	2.24	3.53	6.50	-	-
	293.15	1.24	1.95	3.01	5.40	-	-
	298.15	1.07	1.68	2.48	4.48	8.75	-
	308.15	0.98	1.34	1.94	3.31	6.58	16.36
	313.15	0.81	1.19	1.69	1.96	4.88	13.08
	318.15	0.71	1.05	1.43	2.47	3.91	10.56
	323.15	0.72	0.97	1.29	2.19	3.68	8.63
	328.15	0.57	0.88	1.13	1.93	2.71	7.19
	333.15	0.51	0.80	1.00	1.72	2.29	6.06
	338.15	0.43	0.74	0.86	1.54	1.84	5.12
	343.15	0.46	0.69	0.81	1.41	1.82	4.42
	353.15	0.31	0.58	0.63	1.16	1.14	3.33
	358.15	0.28	0.54	0.55	1.06	0.98	2.91
Fructose	273.15	1.86	3.57	5.35	11.96	28.17	114.12
	278.15	1.60	2.95	4.21	9.32	21.03	82.38
	283.15	1.68	2.52	4.33	8.02	19.20	63.46
	288.15	1.32	2.12	3.20	6.05	13.25	41.52
	293.15	1.18	1.84	2.73	5.02	10.48	31.43
	298.15	1.02	1.59	2.15	4.17	8.00	24.30
	308.15	0.93	1.27	1.96	3.08	5.99	14.76
	313.15	0.77	1.12	1.52	1.83	4.51	11.83
	318.15	0.67	0.99	1.24	2.30	3.65	9.57
	323.15	0.69	0.92	1.29	2.04	3.40	7.81
	328.15	0.54	0.83	1.02	1.80	2.48	6.49
	333.15	0.48	0.76	0.90	1.61	2.11	5.48
	338.15	0.41	0.70	0.76	1.43	1.68	4.62
	343.15	0.44	0.65	0.81	1.32	1.70	4.00
	353.15	0.30	0.55	0.57	1.08	1.03	3.00
	358.15	0.26	0.51	0.51	0.99	0.88	2.62

6 . *CAPÍTULO 3*

Journal of Molecular Liquids, 2021, 116254, p 1-11.

Transport properties of saturated sucrose and maltitol solutions as affected by temperature

Maria Julia Neves Martins^a, Pedro Esteves Duarte Augusto^{b,c}, Javier Telis-Romero^a, Tiago Carregari Polachini^a

^a **Food Engineering and Technology Department, São Paulo State University (Unesp), Institute of Biosciences, Humanities and Exact Sciences (Ibilce), Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brazil.**

^b **Department of Agri-food Industry, Food and Nutrition (LAN), Luiz de Queiroz College of Agriculture (ESALQ), University of São Paulo (USP), Piracicaba, SP, Brazil**

^c **Food and Nutrition Research Center (NAPAN), University of São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brazil**

Abstract: Saturated sugar solutions have been used to enhance mass transfer in osmotic dehydrations processes and as ingredients in food and pharmaceutical industries. Although sucrose is a traditional and versatile solute, consumers demand the use of natural sweeteners as maltitol to formulate foods with reduced calorie. However, the thermophysical properties of those saturated solutions are rarely reported in the literature. Therefore, this work determined transport properties (solubility, density, viscosity, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity) of saturated solutions of sucrose and maltitol in a wide range of temperatures. Empirical and theoretical models were fitted to the experimental data. Solubility of maltitol was more strongly influenced by temperature than sucrose. For both solutions, density and thermal diffusivity showed increasing values with increasing temperature while specific heat and thermal conductivity showed decreasing values at the same conditions. Although viscosity of saturated sucrose solutions decreased with increasing temperature, increasing viscosities were observed for maltitol solutions at the same temperatures. Proposed models showed good fitting accuracy ($R^2 \geq 0.83673$; $MRE \leq 13.07\%$), creating an important and accurate database for saturated solutions of sucrose and maltitol for further applications in different processes.

Keywords: sugar solutions, polyol solutions, natural sweeteners, thermophysical properties, mathematical modeling.

6.1 Introduction

Sucrose is a universal solute in the food industry, being used in several products and processes as sweetener, crystallization and dehydration agent, shelf-life extension, among others. In spite of being a widely used and affordable ingredient, consumers have demanded products with reduced calories, non-cariogenic and without negative impact on glycemic index. In this sense, alternative sweeteners, such as polyols, have their use increased not only in food products but also in the pharmaceutical industry (DIGIOACCHINO; BRUNI; RICCI, 2020).

Maltitol is a disaccharide polyol that can be found in the form of both powder and syrups. It has similar characteristics to sucrose in which concerns sensory properties, with sweetness 80-90% comparable to sucrose. In addition, maltitol provides a pleasant sweetness taste without residual flavour as many other sweeteners. Consequently, it is widely applied in both food and pharmaceutical formulation (AYENNEW et al., 2009; RICE et al., 2019). The fact that molar mass of sucrose and maltitol are similar (around 2 g/mol) makes many practical applications adaptable for both solutes (ROZZI, 2007). In most food formulations, maltitol is not only used due to its high sweetening power but also thanks to its stability up to 473.15 K and by being non-conducive to Maillard-type browning reactions (HEUME; RAPAILLE, 1996). This compound can also be useful for different non-sweetener applications, such as retarding bread staling (DING et al., 2019) or promoting mass transfer (BIALIK et al., 2020).

However, although widely used in food and pharmaceutical industries, the physical properties of polyols are still rarely reported, in special considering specific conditions of industrial application. For instance, the osmotic dehydration is a rising strategy to increase food shelf life maintaining their sensory and nutritional characteristics (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; JAIN et al., 2011; PRITHANI; DASH, 2020). It has been applied both under conventional conditions and in combination with intensifying techniques such as ultrasound (FERNANDES et al., 2019) and pulsed vacuum (DE MELLO et al., 2019). Three main mechanisms occur concomitantly in this mass transfer process, due to the chemical potential difference between the hypertonic solution and the food itself (GERMER et al., 2011): water leaving the food towards the solution, solute entering into the food matrix and the loss of nutrients from the product to the solution.

Although sucrose plays an important role in osmotic dehydration (YADAV; SINGH, 2012), maltitol has being considered one interesting alternative for dehydrating

fruits, such as apples (CICHOWSKA et al., 2020), kiwi berries (BIALIK et al., 2020) and yacon (MENDONÇA et al., 2016). In the case of products with crispy texture such toppings and crystallized, the low hygroscopicity of maltitol (HEUME, M., RAPAILLE, 1996) also contributes for conferring longer shelf life to dehydrated food products when exposed to atmospheric conditions.

Faster water removal and solids incorporation can be obtained when the solute concentration of the osmotic solution is at the threshold saturation point. Moreover, saturated solutions can be useful for other food and pharmaceutical applications. However, although physical properties are important to precisely design processes and products, these properties are rarely reported in the literature considering hypertonic solutions up to the threshold solubility (BAGHBANBASHI; PAZUKI, 2014).

In fact, the thermophysical properties of saturated solutions behave differently with changes in working temperature when compared to unsaturated solutions, highlighting the importance of evaluating them. As the temperature increase, the solubility of a given solute also tends to increase. Because of that, saturated solutions are supposed to present higher solute content with increasing temperature – being these variations dependent on the solubility and molecular weight of the solute, for example (RAMYA; JAIN, 2017). Even though solutions with high viscosity and density tend to resist against the momentum and mass transfer, lower thermal properties tend to be found at these conditions as a consequence of the higher solid concentration (MARTINS et al., 2020).

Consequently, the objectives of this work were: a) to firstly investigate the solubility of saturated solutions of sucrose and maltitol in aqueous medium under different temperatures (273.15–353.15 K); b) to experimentally determine density, viscosity, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity for the corresponding saturated solutions in the same temperature range as solubility; and c) to fit mathematical models and empiric equations to the experimental data in order to obtain predictive equations for the studied properties, as well as to present the temperature dependence of each property.

6.2 Materials and Methods

6.2.1. Raw materials and sample preparation

Sucrose and maltitol of analytical grade were obtained by Sigma Aldrich (Steinheim, Germany). The saturated solutions of sucrose and maltitol used for

measuring the physical properties were prepared based on the solubility data. The solutes were weighed in an analytical balance with precision of 0.01 g (AUX220, Shimadzu, Japan) and added to distilled water. The solution was kept under magnetic stirring (C-MAG HS 7, IKA, USA) at the required temperature, monitored with a thermocouple (AK05, AKASO, Brazil). After complete dissolution, the soluble solids content of the solutions was measured using a portable digital refractometer (HI 86801, Hanna Instruments, Romania).

6.2.2. Solubility

An isothermal system (Figure 6.1) was used to determine the solubility of each solute in water at different temperatures. The apparatus consisted of an equilibrium jacketed cell, in which water was constantly recirculated in the jacketed side from an ultra-thermostatic bath (Marconi, model MA-184). The inner recipient with 50 mL of capacity has two inlets for feeding and sampling the solutions. A Teflon stopper is placed at the top opening not only to seal the recipient but also to support a type K thermocouple (MT-455, Minipa, USA). A thermocouple was immersed into the solution to register the medium temperature.

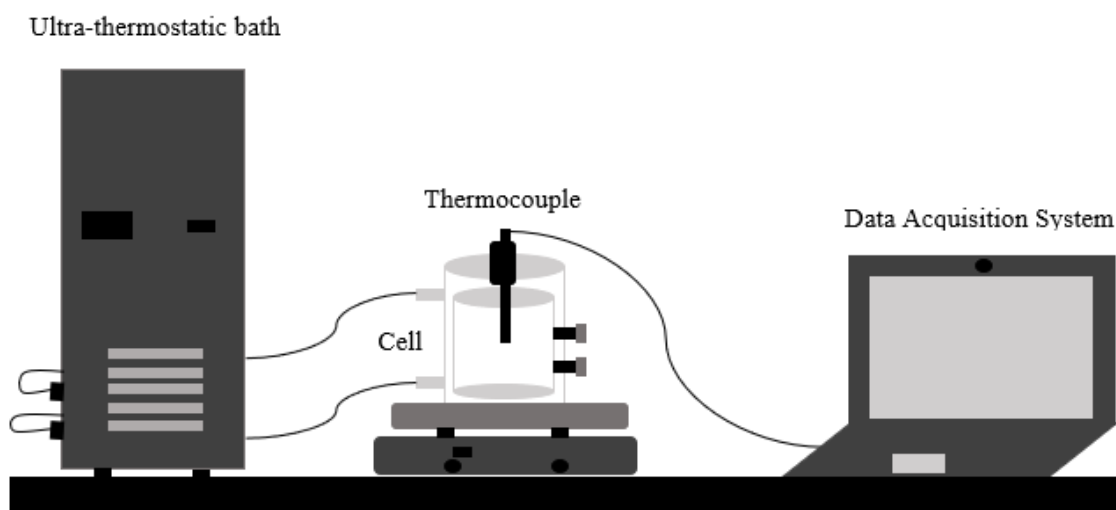


Figure 6.1. Experimental apparatus used for determining solubility of sucrose and maltitol in water.

For the experimental measurements, 50 mL of distilled water was initially inserted into the recipient and the system was kept under magnetic stirring to reach the desired temperature. After attaining the equilibrium, the solute was added to the stirred

solution until forming a precipitate – characterizing the saturation point. The saturated solution was maintained under stirring at the specific temperature during 50 h and a subsequent settling time of 24 h was considered before sampling (BENSOUISSI; ROGE; MATHLOUTHI, 2010).

Then, three aliquots of approximately 10 mL were taken from the supernatant using a syringe to avoid carrying solids. The soluble solids content was measured using a gravimetric method by weighing the aliquots in glass plates before and after vacuum oven drying (model TE-395, Tecnal, Brazil) at 353.15 K until reaching constant weight. This procedure was conducted in triplicate at the temperatures of 273.15, 278.15, 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 303.15, 308.15, 313.15, 318.15, 323.15, 328.15, 333.15, 338.15, 343.15, 348.15 and 353.15 K.

6.2.3. Density

The density of the saturated solutions of sucrose and maltitol was determined in a density meter (DMA 4500 M model, Anton Paar, Austria), as described by Martins et al. (2020). The equipment was calibrated with deionized water and air previously to each measurement. Approximately 2 mL of the saturated solution at the temperature of analysis was inserted into the equipment and the density was read in triplicate at 273.15, 278.15, 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 303.15, 308.15, 313.15, 318.15, 323.15, 328.15, 333.15, 338.15, 343.15, 348.15 and 353.15 K. The results were transferred to a computer through a data acquisition system.

6.2.4. Viscosity

Apparent viscosity was determined from the steady-state flow curves, similarly as reported by Carvalho et al. (2015). For this, a temperature- and stress-controlled rotational rheometer (AR 2000 model, TA Instruments, New Castle, England) coupled with a conical plate geometry (52 μm gap, 60 mm diameter, 4° angle) was used. Approximately 2 mL of the sample were placed onto the plate and increasing shear rates ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) were established from 0.84 up to 168.44 s^{-1} . The corresponding shear stress (τ , Pa) was measured for each point by the data acquisition system. The temperature of the experiments was maintained constant at 273.15, 278.15, 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 303.15, 308.15, 313.15, 318.15, 323.15, 328.15, 333.15, 338.15, 343.15, 348.15 and 353.15 K through the thermostatic system of the equipment. Rheological experiments were performed in triplicate for each solution. The equipment was

previously calibrated with ethylene glycol and chlorobenzene (POLACHINI et al., 2016).

6.2.5. Specific heat

The specific heat capacity was determined through the energy changes when the material was subjected to a heat flow. For this, a differential scanning calorimeter DSC (DCS 8000 model, Perkin Elmer, Shelton) was used. Temperature calibration was performed with indium ($T_f = 429.75$ K; $\Delta H = 28.45$ kJ kg⁻¹) at a flow of heat of 10 K·min⁻¹, using nitrogen 99.5% of purity as gas purge at 20 mL·min⁻¹. Sapphire disks with 3 mm diameter (ref 0219-1.268, Perkin Elmer, Shelton) were used to calibrate the heat flow (ARCHER, 1993).

The ASTM E-1269-05 method for thermally stable solids and liquids (ASTM, 2005) was used for the experimental procedures. Approximately 5 µl of the sample was inserted into aluminum pans (ref 0219-0062, Perkin Elmer) to be then hermetically sealed.

Samples, sapphire disks and baseline were all subjected to the same thermal procedure: isothermal at 273.15 K for 4 min; heat flow of 10 K·min⁻¹ until reaching the temperature of 363.15 K to then be kept isothermal for another 4 min. The specific heat was determined in triplicate at 273.15, 278.15, 283.15, 288.15, 293.15, 298.15, 303.15, 308.15, 313.15, 318.15, 323.15, 328.15, 333.15, 338.15, 343.15, 348.15 and 353.15 K, using the saturated solutions corresponding to each temperature. The PYRIS software (v. 10.1, Perkin Elmer, Shelton) was used for data analysis using Equation (6.1):

$$C_p = D_s / W_s \theta \quad (6.1)$$

where C_p is the specific heat (J·kg⁻¹·K⁻¹), D_s is the vertical displacement between the sample curves and the reference material curve at a given temperature (W), θ is the heat flow (K·s⁻¹) and W_s is the sample mass (kg).

6.2.6. Thermal conductivity

The thermal conductivity was determined using the steady state technique, according to the methodology reported by Martins et al. (2020) for carbohydrate solutions.

The experimental apparatus is composed by a stainless jacketed cylindrical cell with dimensions of 106 cm in length, 9.8 cm in internal diameter and 12.2 cm in external diameter, containing Teflon stoppers at the ends to prevent effects of axial heat flow. The cell was immersed in a thermostatic bath (MA-184, Marconi, São Paulo, Brazil) to control the temperature in the surface of the cell.

After loading the cell with the specific saturated solution, a laboratory DC power supply (MPS-3006D, Minipa, São Paulo, Brazil) with a stability of 0.05%, coupled to a 200 W thermal resistance, was used with the aim of dissipating constant heat flow through the sample. Temperature was recorded by positioning type J thermocouples on the surface of the cell's inner diameter and the resistance. The software LabVIEW (National Instruments, Austin) was responsible by the data acquisition from the data logger (NI 9213 model, National Instruments, Austin). Thermal conductivity λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) could be then calculated by the Fourier equation in cylindrical coordinates after reaching steady state heat flow.

6.2.7. Thermal Diffusivity

Thermal diffusivity was determined by the relationship among thermal conductivity, density and specific heat, given by Equation (6.2) (MARTINS et al., 2020).

$$\alpha = \lambda / \rho \cdot C_p \quad (6.2)$$

where α is the thermal diffusivity ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), λ is the thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ρ is the density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) and C_p is the specific heat ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

6.2.8. Mathematical modeling

Polynomial models of first and second degree, able to be represented by Equations (6.3), were fitted with the experimental data of solubility, density, specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity and viscosity, as they showed to be versatile with suitable accuracy. The best model chosen to represent the experimental data was defined based on the significance ($p_{\text{value}} < 0.05$) of the parameters that accompany the temperature (linear and/or quadratic). The STATISTICA 7.0 software was used for performing the analysis of variance at 95% of confidence as well as to

carry out carry out the mathematical regressions. In the specific case of viscosity, exponential equations as a conventional type (Equation (6.4)) and an Arrhenius-type equation (Equations (6.5)) were also evaluated once they are well-known models commonly used to represent the viscosity dependence on the temperature.

$$\phi = \beta_1 + \beta_2 T + \beta_3 T^2 \quad (6.3)$$

$$\mu = \gamma_1 + \gamma_2 \exp(\gamma_3 T) \quad (6.4)$$

$$\mu = \mu_0 \exp(E_a / RT) \quad (6.5)$$

where β_1 , β_2 , β_3 , γ_1 , γ_2 and γ_3 , are parameters of the model, T is the temperature (K), ϕ refers to the studied property, μ is the viscosity (Pa·s), μ_0 is the pre-exponential parameter (Pa·s), E_a is the activation energy (J·mol⁻¹) and R is the gas constant (8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹).

The determination coefficient R^2 (Equation (6.6)) and mean relative error MRE (Equation (6.7)) were used to evaluate the fitting accuracy:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (Y - Y_i)^2 / \sum_{i=1}^n (Y_i^* - \bar{Y})^2 \quad (6.6)$$

$$MRE(\%) = (100/n) \sum_{i=1}^n |Y_i - Y_i^*| / Y_i^* \quad (6.7)$$

where Y_i , Y_i^* and $\bar{Y}$ are the predicted, experimental and mean values, respectively, and n is the number of experimental measurements.

6.3. Results and Discussion

The solubility of the saturated solutions of sucrose and maltitol as function of temperature are shown in Table 6.S1 (supplementary file) in units of mass fraction, molarity and molality in order to provide important information for different

applications. The Figure 6.2 shows the solubility in the mass fraction unit as function of the absolute temperature. Data varied from 64.45 up to 78.61 g of sucrose·100 g⁻¹ of solution and from 51.89 up to 81.87 g of maltitol·100 g⁻¹ of solution for sucrose and maltitol, respectively.

As it can be seen in Figure 6.2, sucrose and maltitol are solutes with high solubility in water. This property is related to their molecular structure composed of hydroxyl groups disposed in equatorial and axial axis that facilitates the interaction with water molecules by hydrogen bonds (BUBNÍK; KADLEC, 1995). According to Bensouissi, Roge and Mathlouthi (2010), a higher solubility is a result of the preference for water-solute interactions instead of solute-solute interactions. The aforementioned authors stated that the hydration number, i.e. the number corresponding for the first layer of water molecules bound to the solute, are reported to be comparable for both sucrose and maltitol. In addition to the comparable molecular weight, it means the main differences in the solubility are probably related to the conformational disposition of the functional groups. Because the sucrose has more equatorial hydroxyl groups, they probably bind better to the water molecules compared to the opened chain of D-glucitol linked to the glucose unit in the maltose structure (BANIPAL et al., 1997).

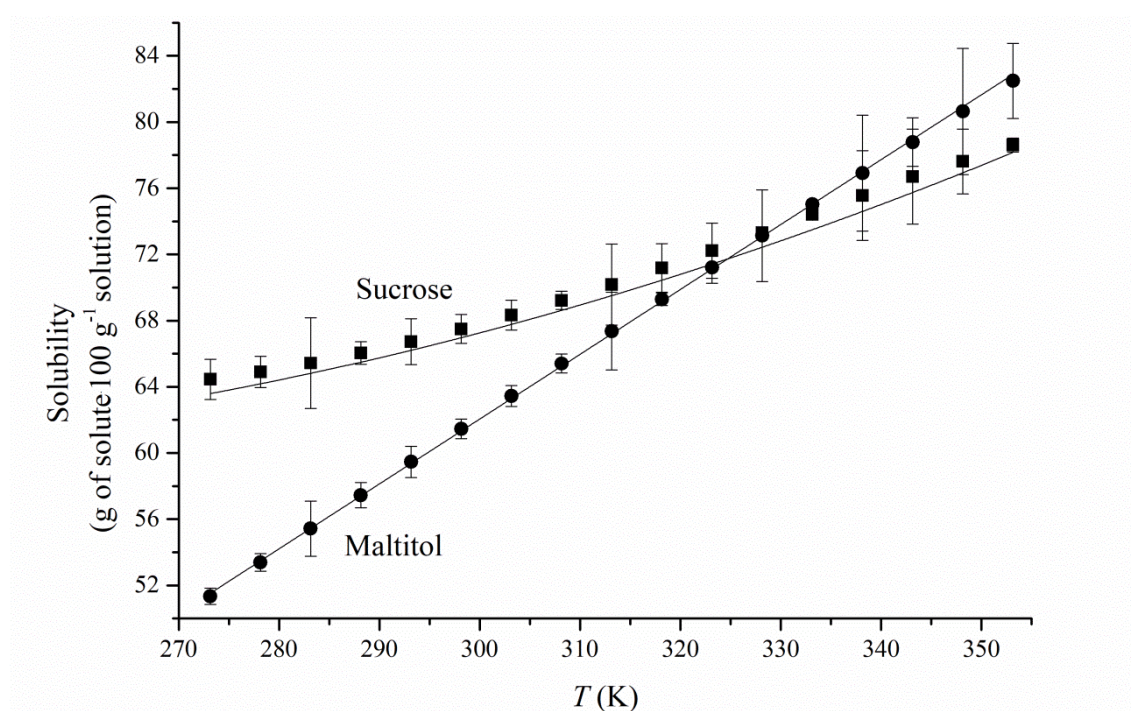


Figure 6.2. Solubility of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.

However, the difference in solubility between these two compounds varied with temperature. In this work, sucrose showed higher solubility in water than maltitol up to the temperature of 333 K; however, maltitol assumed higher solubility in water than sucrose above this temperature. This temperature range where sucrose and maltitol invert their solubility is exactly the conditions of most food processes, including osmotic dehydration.

The higher energetic degree of the molecules at higher temperature can make the glucitol units of maltitol even more flexible – making easier the establishment of hydrogen bonds with less energy and less steric hindrance than for the fructose unit in the sucrose structure (BENSOUISSI; ROGE; MATHLOUTHI, 2010).

Saturated solutions of sugars confers a higher mass transfer potential for the osmotic dehydration: the greater the difference in the chemical potential between the product and the osmotic solution, the greater is the driving force in osmotic dehydration process, especially in the first processing steps (ZAHOOOR; MA, 2017). In fact, some authors aimed at working with solutions close or at the threshold saturation point in order to enhance the osmotic dehydration process of strawberry (AMAMI et al., 2017), apple (ALLALI; MARCHAL; VOROBIEV, 2010; ASSIS; MORAIS; MORAIS, 2017), starfruit (BARMAN; BADWAIK, 2017), pineapple (ZAHOOOR; MA, 2017) and persimmon fruit (BOZKIR et al., 2019). The presented results, therefore, can be useful to better design those processes.

After determining the concentration for saturating the solutions, the density of the saturated sucrose and maltitol solutions were determined, as described on Table 6.S2 (supplementary file) and Figure 6.3 the mean values ranged from 1205 up to 1243 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and from 1155 up to 1247 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for saturated solutions of sucrose and maltitol, respectively, with less than 9% of standard deviation.

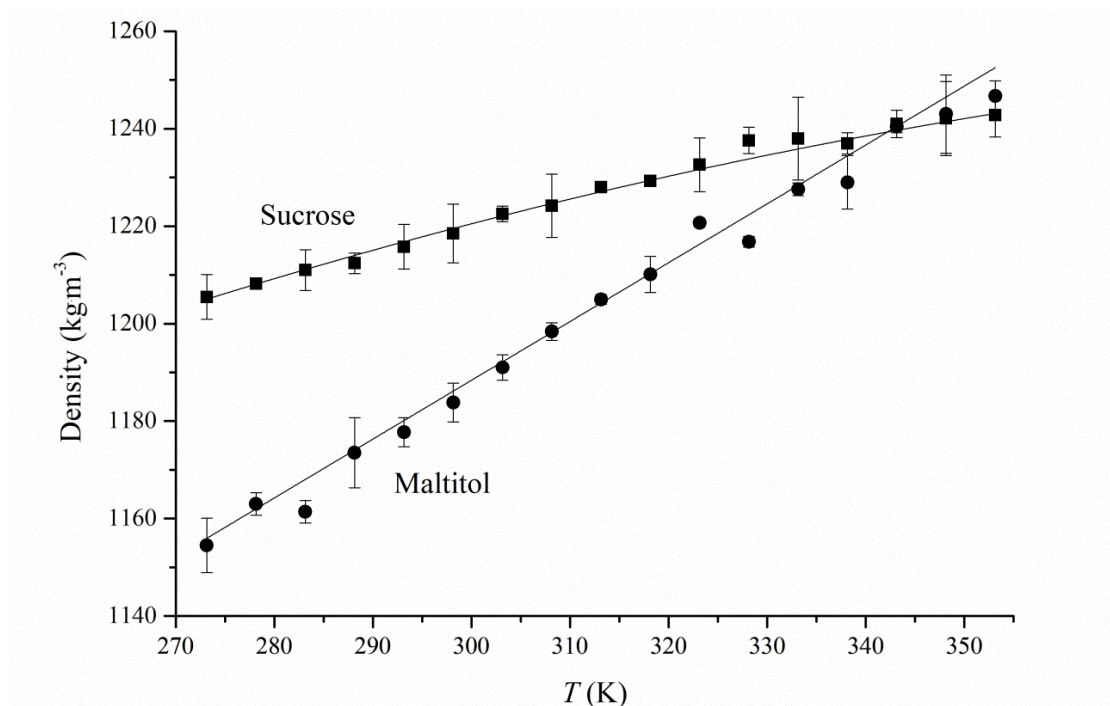


Figure 6.3. Density of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.

The densities of both solutions increased with increasing temperature, similarly as occurred for solubility. In fact, the higher was the temperature of the solution, the greater was the solubility and the quantity of solute dissolved into the studied volume. However, the density of maltitol solutions showed a greater variation with changes in the temperature than sucrose solutions, which is probably attributed to the higher solubility dependence on the temperature of the first. Although saturated sucrose solutions showed higher density than maltitol solutions, this difference became less pronounced with increasing temperature. Jiang, Zhu and Ma (2013) states that solutions with higher concentrations, and consequently higher average molecular weight, tend to present higher density. Thus, solute concentration and density of the saturated solutions of sucrose and maltitol became more comparable with no big differences at temperatures higher than the crossing point of Figure 6.2 and 6.3 (~330 K).

Because saturated solutions show densities with high temperature (and solubility) dependence, osmotic dehydration processes should be correctly designed to avoid working with temperatures at which the osmotic solutions are denser than the food – occasioning the food floating and inhomogeneous mass transfer (MARTINS et al., 2020). Moreover, in osmotic dehydration of fruits with the assistance of ultrasound,

density is one of the properties that can interfere in the propagation of ultrasonic waves, being an external resistance (FERNANDES et al., 2019; PRITHANI; DASH, 2020; RAHAMAN et al., 2019). For this reason, knowing how the physical properties of these special kinds of solutions change when the operation conditions are altered is useful not only for designing conventional operations and equipment but also for optimizing osmotic dehydration processes assisted by emerging technologies – such as ultrasound, for example.

Based on density, the industrial facilities do not need significant adaptations to transport both maltitol or sucrose saturated solutions during osmotic dehydrations processes under these conditions. However, it is important to highlight the required energy for pumping, mixing, overcoming pressure loss in tubes and accessories is also dependent on the rheological parameters.

The shear rate versus shear stress data were obtained from the steady-state flow curves. As expected for sugar solutions (DE SOUZA; TELIS-ROMERO; TELIS, 2010), shear stress increased linearly ($R^2 > 0.99$) with increasing shear rate with the absence of yield stress for both saturated solutions of sucrose and maltitol. In these conditions, the saturated solutions assumed Newtonian behaviour – being the Newtonian viscosity determined through the slope of the flow curves.

The solution viscosity over experimental conditions is shown in Table 6.S3 (supplementary file) and plotted in the Figure 6.4 viscosity ranged from 0.072 up to 0.360 Pa·s and from 0.059 up to 0.160 Pa·s for saturated solutions of sucrose and maltitol, respectively. The values for sucrose solution differed less 13% from the ones reported by De Souza, Telis-Romero and Telis (2010), reported in a narrower range of temperature – confirming the reliability of the method for determining such properties in wider ranges of temperature.

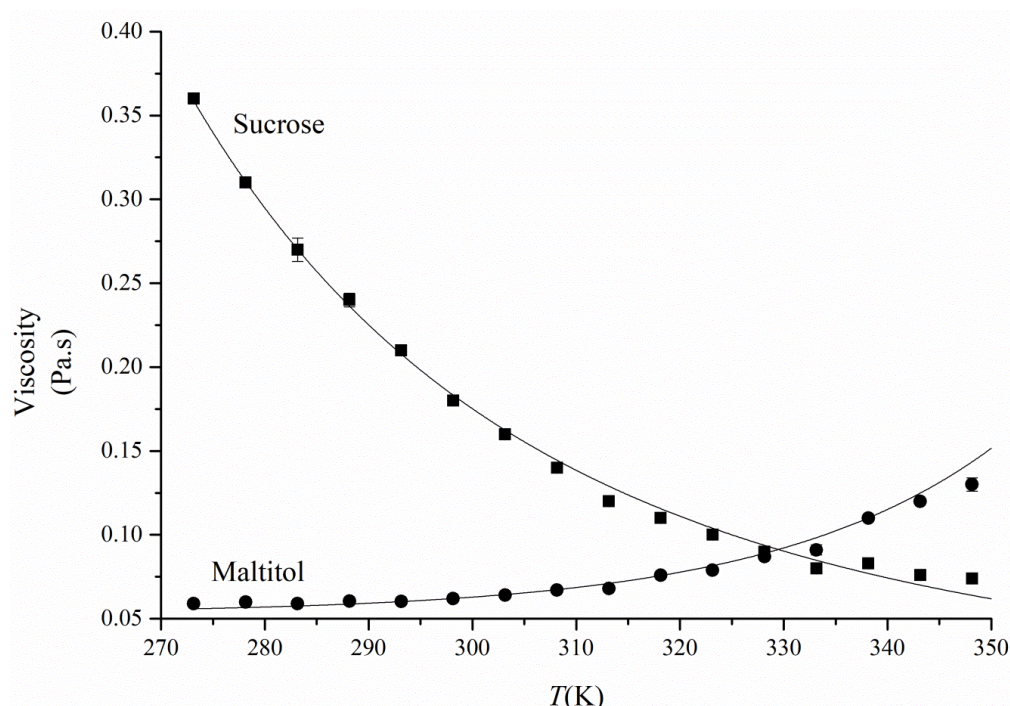


Figure 6.4. Viscosity of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.

For saturated sucrose solutions, viscosity decreased exponentially when the temperature increased. Similar behavior was reported for saturated sucrose solution (BENSOUISSI; ROGE; MATHLOUTHI, 2010; DE SOUZA; TELIS-ROMERO; TELIS, 2010), trehalose (MILLER; DE PABLO; CORTI, 1997), supersaturated aqueous glucose, fructose and glucose-fructose solutions (LAOS; HARAK, 2014), honey and other saturated carbohydrate solutions such as fructose and glucose (RECONDO; ELIZALDE; BUERA, 2006). Mossel et al. (2000) attributed the reduction in viscosity with increasing temperature to the reduction of the hydrodynamic forces and molecular friction when the molecules are encountered at higher agitation degree. The effect of temperature – and consequently of the solubility – on the viscosity was more predominant even though there was a slight increase in the solute concentration to saturate the carbohydrate solution at higher temperatures. It is in accordance to the solubility data of sucrose (Figure 6.2), which had smaller variations in the solubility when increasing temperature compared to maltose.

On the other hand, for saturated maltitol solutions, there was a slight viscosity increase with increasing temperature. Although apparently strange, this result is due to the different concentrations in each condition, being consistent with the solubility

results. In fact, Bensouissi, Roge and Mathlouthi (2010) present the similar contrasting behavior when comparing the viscosity of saturated solutions of maltitol and sucrose when analyzing susceptibility for solute nucleation in slightly narrower ranges of temperature and higher shear rates. At low temperatures, the solute concentration of maltitol is lower than sucrose solutions – leading to the lower viscosity values of saturated maltitol solutions when compared to sucrose ones. As the temperature increases up to ~330 K, and so the solute concentration, the solubility and viscosity values become closer. However, above this temperature, the viscosity of the saturated maltitol solutions increase considerably while the viscosity of the saturated sucrose solutions continued to decrease exponentially - even though there were no big differences in their solubilities.

The viscosity difference between the studied solutions can be related to several factors, such as the molecular weight of the solute, molecular structure and the interactions between hydroxyl groups and water molecules (BOUCHARD; HOFLAND; WITKAMP, 2007). However, in the specific comparison between maltitol and sucrose, molecular structure and hydrogen bonds interactions with water molecules are the main responsible for the observed differences. At the same time the linear chain of the D-glucitol provides a greater exposure area for binding water molecules, it can be responsible for causing a higher intermolecular interaction and frictional forces among them at a higher agitation degree and higher solute concentration. Sucrose molecules tend to be more compacted by the two ring carbohydrate, which makes their flow in aqueous medium easier at higher temperatures even though there was a simultaneous increase in the solute concentration. Jiang, Zhu and Ma (2013) reinforced the effects of the conformational structure on the rheological behavior of carbohydrates solutions.

Concerning the experimental data of density and viscosity and energy savings related to fluid transport, it is recommended to work with saturated solutions at temperatures around 330 K. At this point, similar processing conditions could be used when saturated solutions of maltitol were aimed to be used in replacement of sucrose to produce food or pharmaceutical products. Increasing temperature would have a noticeable impact in the viscosity of saturated maltitol solutions that should be significantly compensated by technological advantages.

The specific heat of the saturated solutions of sucrose and maltitol are shown in Table 6.S4 (supplementary file). They were also plotted in Figure 6.5 against the absolute temperature. The mean experimental values varied from 1.07 to 1.71

$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and from 0.91 to $2.09 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ for sucrose and maltitol, respectively. These values are in accordance to the reported data for different sugar solutions at comparable conditions and similar molecular weight as sucrose and maltose (BROWN et al., 2005; JAGANNADHA RAO; DAS; DAS, 2009; MARTINS et al., 2020).

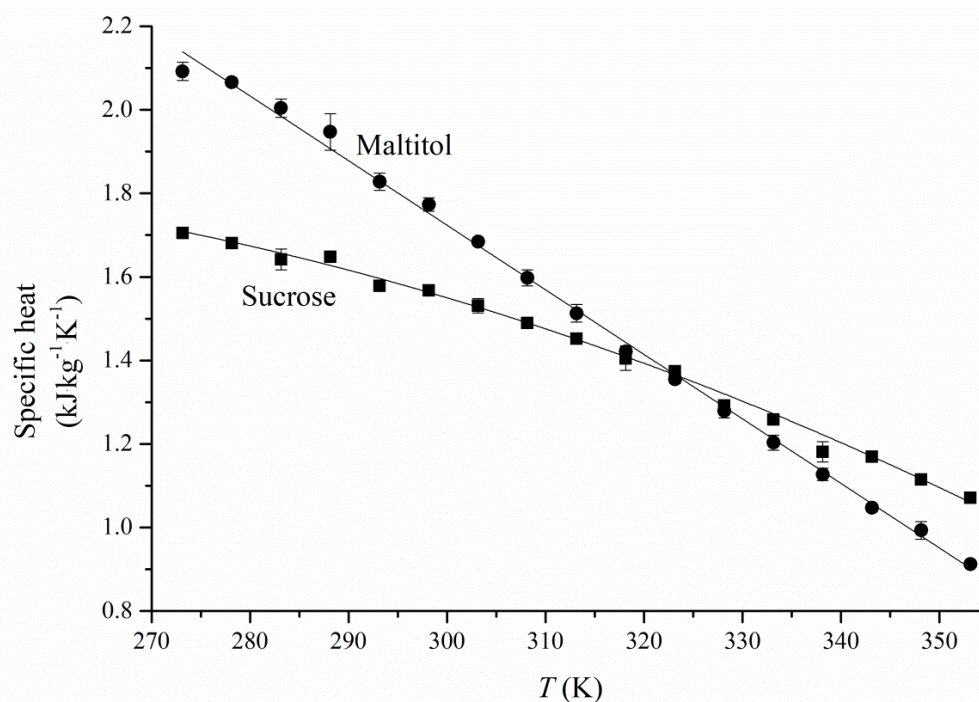


Figure 6.5. Specific heat of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.

The saturated solutions of maltitol showed higher specific heat up to 330 K, conditions at which solute concentration are lower than for saturated sucrose solutions. It means the temperature control of saturated maltitol solutions tends to demand more energy at low temperatures. Above this temperature, sucrose assumed higher values – following the same trend of solubility. The crossing temperature of $\sim 330 \text{ K}$ indicates that, at this point, both saturated solutions need the same amount of energy to have their temperature increased or controlled at a given set-point. Fluctuations in the thermal exchanges signals during on-line monitored process at fixed temperature can give insights about the state of the sugar solutions during processes as sugar solution concentration for different uses as the osmotic dehydration itself (FLOURY; LE BAIL; PHAM, 2008; ZACCHI; AXELSSON, 1989).

The trend of these experimental values are in accordance to Martins et al. (2020) and Alarcón et al. (2020), who presented a reduction in the specific heat of carbohydrate solutions with increasing solute concentration as a consequence of the lower heat capacity of the carbohydrates in comparison with water. In other words, the values of specific heat are supposed to be more influenced by the solute concentration than by the effects of the working temperature itself once an increase in the latter usually makes the C_p to increase (WANG et al., 2018).

The thermal conductivity of the saturated solutions of sucrose and maltitol are shown in Table 6.S5 (supplementary file) and in Figure 6.6 the mean experimental values varied from 0.38 to 0.39 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and from 0.36 to 0.41 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ for saturated solutions of sucrose and maltitol, respectively. These values are in agreement with the reported data for aqueous sugar solutions and/or up to the threshold solute concentration (ASTOLFI-FILHO et al., 2010; JAGANNADHA RAO; DAS; DAS, 2009; SIMION et al., 2011).

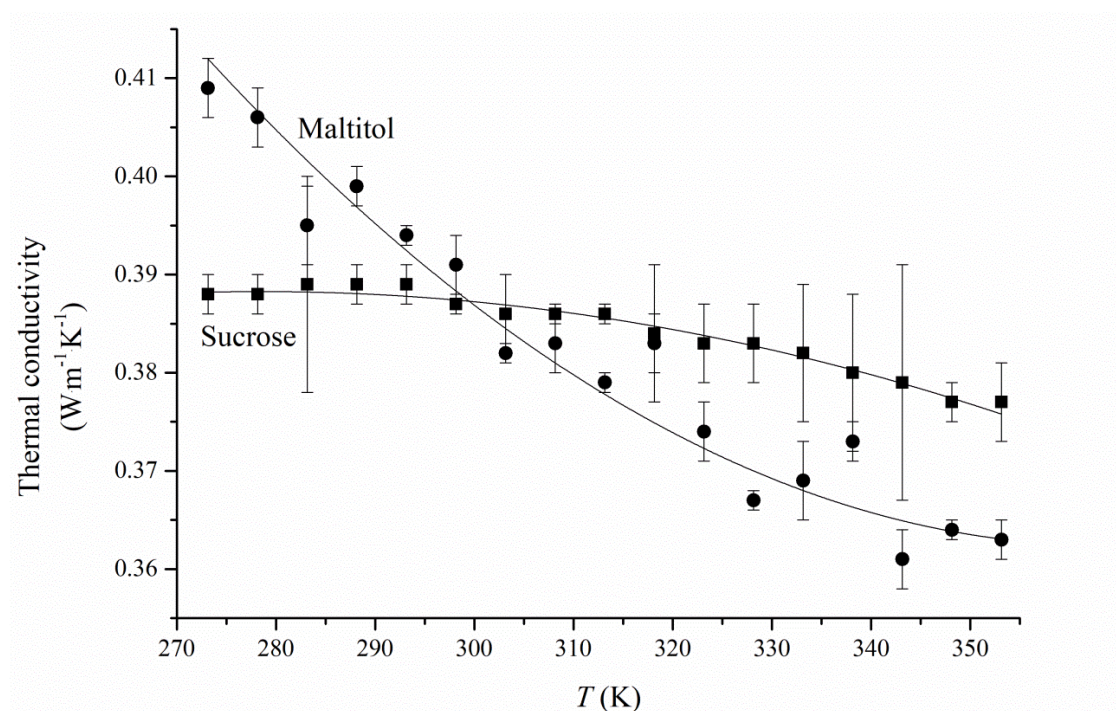


Figure 6.6. Thermal conductivity of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.

In both solutions, the thermal conductivity decreased with increasing temperature – however with a different trend. The effect of temperature in the thermal

conductivity of saturated sucrose solution was less pronounced than the in the maltitol solutions. This behavior may be due to the distinct solubility properties of the solutes, causing a higher difference in the solute concentration as the temperature increases. At lower temperatures, the saturated solution of maltitol showed higher values of thermal conductivity, presenting insights for a better energy transfer in these conditions. Similarly as observed for the previous properties, the thermal conductivity of both solutions also showed an intersection point around 300 K – defining a point at which the saturated sucrose solution started to have a higher thermal conductivity than the saturated maltitol solution. The presence of higher concentration of the solute impairs the heat transfer in solutions, which lead to lower thermal conductivities at higher temperatures. These effect is not only reported for sugar solutions (MARTINS et al., 2020) but also for more complex solutions as yellow mombin juice (ASSIS et al., 2006) and biomass suspensions (POLACHINI et al., 2020), which observed the thermal conductivity decreases as the solids concentration increases with a much higher effect than the temperature.

Thermal conductivity is an important parameter when working with processes that involve heat transfer, such as drying, pasteurization and the own osmotic dehydration. Osmotic solutions with high thermal conductivity make the heat transfer during osmotic dehydration easier and less energy expensing, as well as the pasteurization of the osmotic solution itself. On the other hand, process design should be carefully performed since these same solutions tend to present less solute concentration, which could lead to lower driving force for mass transfer.

The thermal diffusivity of the saturated solutions of sucrose and maltitol could be calculated by the relation among density, thermal conductivity and specific heat. Means and standard deviations are shown in Table 6.S6 (supplementary file) and in Figure 6.7 the mean values ranged from 1.89×10^{-7} up to $2.84 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ for saturated sucrose solutions and from 1.69×10^{-7} and $3.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ for saturated maltitol solutions. The propagation of the previous experimental standard deviations showed to be lower than 1%, resulting in accurate data. The values found for the saturated solutions are close to those reported for green soursop pulp (JARAMILLO-FLORES; HERNANDEZ-SANCHEZ, 2000), orange juice (EWETUMO, T., BEN FESTUS, 2017) and pomegranate (*Punica granatum*) fruit (MUKAMA; AMBAW; OPARA, 2019) under similar conditions of soluble solids concentrations and temperature.

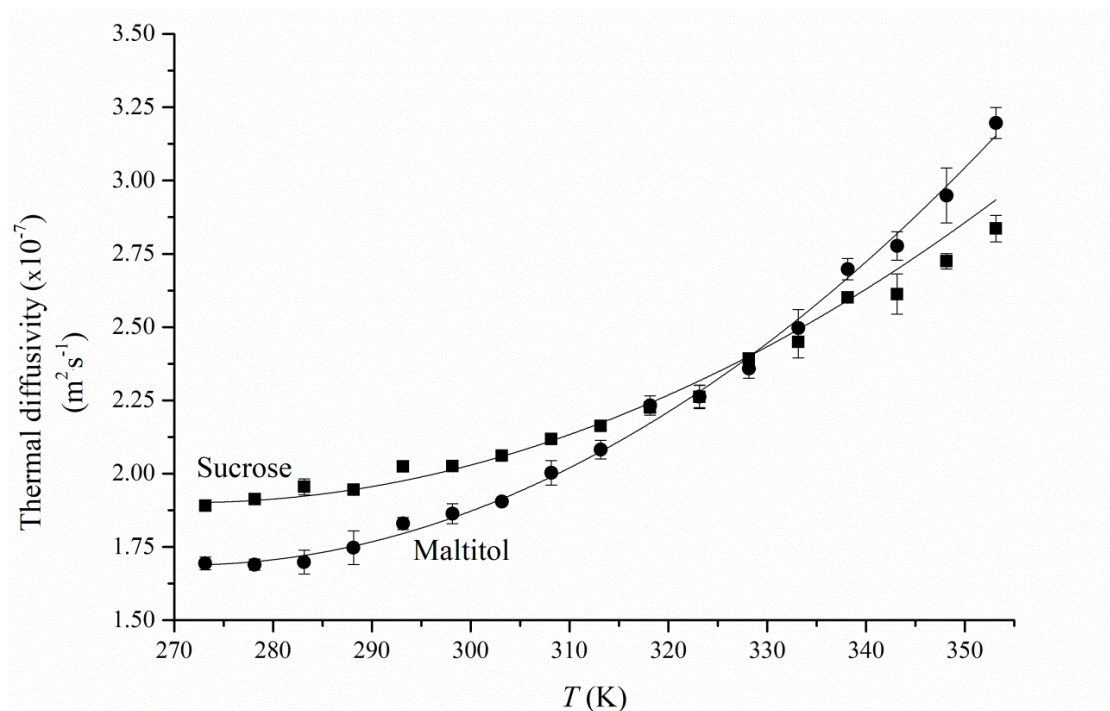


Figure 6.7. Thermal diffusivity of sucrose and maltitol in water at different temperatures. Dots are the average values, and the vertical bars the standard deviation. Lines represent the best model fitted.

Thermal diffusivity showed an increasing trend with increasing temperature for both solutions. Even though the thermal conductivity of the saturated solutions decreased and density increased with increasing temperature, the decreasing specific heat values with increasing temperatures showed to govern the thermal diffusivity behavior. The saturated sucrose solution had higher thermal diffusivity than maltitol up to the temperature range of ~ 330.0 K and, from this point on, the values for saturated maltitol solution overcame the values for sucrose solutions. Greater thermal diffusivity means easier heat transfer and shorter time to reach steady-state heat, demanding lower energy and promoting better control of food processes (POLACHINI et al., 2020).

The availability of versatile equations that provide accurate information about the solutions properties is of great importance for the industry, which concerns not only the design of equipment and processing conditions but also the quality evaluation. For this reason, different models (polynomial, exponential and Arrhenius-type equations) were fitted to the experimental data of solubility, density, viscosity, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of the saturated solutions of sucrose and maltitol.

Table 6.1 presents the fitting parameters of the best and simpler models for each studied property. The best fitted curves were also shown in Figure 6.2-6.7 for the corresponding property. For solubility, density and specific heat, the quadratic model was better fitted to the saturated sucrose solution, while a linear fitting could better represent experimental data of the saturated maltitol solution with good accuracy ($R^2 > 0.969$ and $MRE < 1.5\%$). A second order polynomial model showed a good fit ($R^2 > 0.947$ and $MRE < 1.7\%$) to the experimental data of thermal conductivity and thermal diffusivity for both solutions. All parameters presented in the mathematical modeling showed to be significant at a confidence interval of 95%. The fitting procedure of polynomial models to experimental data of different thermophysical properties is commonly used for food products because of its good accuracy with versatility for practical applications (FONTAN et al., 2018; HAO et al., 2006; KOLAROV, K. M., GROMOV, 1973; PHINNEY; FRELKA; HELDMAN, 2017; RIBEIRO et al., 2017).

Table 6.1. Fitting parameters of best model to describe solubility, density, viscosity, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of the saturated solutions of sucrose and maltitol.

Property	Sucrose		Maltitol	
	Parameters		Parameters	
Solubility in water (g of solute · 100 g ⁻¹ solution)	β_1	96.87	β_1	-55.55
	β_2	-0.35	β_2	0.39
	β_3	8.60×10^{-4}	β_3	-
	R^2	0.9987	R^2	0.9999
	MRE (%)	1.34	MRE (%)	0.65
Density (kg · m ⁻³)	β_1	863.26	β_1	826.15
	β_2	1.83	β_2	1.21
	β_3	-2.13×10^{-3}	β_3	-
	R^2	0.9895	R^2	0.9685
	MRE (%)	0.07	MRE (%)	0.24
Viscosity (Pa · s)	β_1	6.82	β_1	2.07
	β_2	-3.94×10^{-2}	β_2	-1.38×10^{-2}
	β_3	5.76×10^{-5}	β_3	2.37×10^{-5}
	R^2	0.9964	R^2	0.9744
	MRE (%)	5.92	MRE (%)	5.16
	γ_1	5.96×10^{-2}	γ_1	5.31×10^{-2}
	γ_2	138211.31	γ_2	9.35×10^{-9}
	γ_3	-4.70×10^{-2}	γ_3	4.62×10^{-2}
	R^2	0.9559	R^2	0.9972
	MRE (%)	5.80	MRE (%)	3.12
	μ_0 (Pa · s)	1.20×10^{-4}	μ_0 (Pa · s)	7.65

	E_a (J mol ⁻¹)	18174.14	E_a (J mol ⁻¹)	-11884.78
	R^2	0.9953	R^2	0.8367
	MRE (%)	5.30	MRE (%)	13.07
Specific heat (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	β_1	0.16	β_1	6.37
	β_2	1.64×10^{-2}	β_2	-1.55×10^{-2}
	β_3	-3.92×10^{-5}	β_3	-
	R^2	0.9944	R^2	0.9974
	MRE (%)	0.82	MRE (%)	0.89
Thermal conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	β_1	0.25	β_1	0.90
	β_2	1.01×10^{-3}	β_2	-2.73×10^{-3}
	β_3	-1.87×10^{-6}	β_3	3.44×10^{-6}
	R^2	0.9715	R^2	0.9468
	MRE (%)	0.66	MRE (%)	0.88
Thermal diffusivity $\times 10^7$ (m ² ·s ⁻¹)	β_1	10.6741	β_1	17.1549
	β_2	-0.0659	β_2	-0.1145
	β_3	1.24×10^{-4}	β_3	2.12×10^{-4}
	R^2	0.9882	R^2	0.9900
	MRE (%)	1.48	MRE (%)	1.70

Besides the second-degree polynomial models, specific exponential models as the Arrhenius-type exponential model are used to predict rheological properties of food products including concentrated sugar solutions with good accuracy (DE CASTILHOS et al., 2018; DE SOUZA; TELIS-ROMERO; TELIS, 2010; RECONDO; ELIZALDE; BUERA, 2006; RIBEIRO et al., 2017; TELIS et al., 2007). An Arrhenius-type equation could be adequately fitted to the experimental viscosity data with $R^2 > 0.837$ and $MRE < 15.0\%$ for both saturated solutions. The activation energy (E_a), defined by the viscosity sensitivity when temperature changes (LAOS; HARAK, 2014) demonstrated to be higher in modulus for saturated sucrose solutions (~ 18 kJ·kg⁻¹) than for maltitols (~ 12 kJ·kg⁻¹). It means the viscosity of saturated sucrose solutions changed more drastically with temperature variations than for maltitol solutions. In fact, activation energy for maltitol had an opposite sign because of the increasing values with increasing temperature, contrary to sucrose. In other words, the temperature effect on saturated sucrose solutions was more evident because the solubility of sucrose changes less than for maltitol. These observations were in accordance to the experimental data observed in Figure 6.4.

Because of the simultaneous effect of solute concentration and temperature, an additional exponential model (Equation (6.5)) was fitted to the experimental data. It showed good accuracy in describing the viscosities of both solutions ($R^2 > 0.956$ and $MRE < 6.0\%$). Comparing all models tested for viscosity, the best overall fitting for

sucrose solution was the Arrhenius-type equation which has a more pronounced effect of temperature. Even though the polynomial model showed slightly higher R^2 , a slightly higher MRE was also found when compared to the Arrhenius-type equation. Once the maltitol solubility changed more intensely with temperature, a common exponential model could comprise the simultaneous effect of both variables.

Considering that saturated solution of sucrose and maltitol are constituted of simple carbohydrate and water, another alternative is to predict thermophysical properties by using re-evaluated models of Choi and Okos (1986) for the component groups as done for by Phinney, Frelka and Heldman (2017). However, such models does not predict physical and chemical interactions that may result in significant differences between experimental values or even between other models. In fact, the equations proposed by Phinney, Frelka and Heldman (2017) resulted in a mean relative error of 13-14%, 67-69% and 6-10% when comparing experimental density, specific heat and thermal conductivity, respectively, for both solutions. These deviations demonstrated higher values compared to the equations fitted in the present study ($MRE < 1\%$ for the same properties).

Although component-based equations are traditional models and provide useful information, fitting predictive equations to accurate experimental data of specific products are still a must. It can provide reliable information about the thermophysical properties of saturated solutions to be further used in different food processes that comprise a wide range of temperatures.

6.4 Conclusion

Transport properties of sucrose and maltitol in aqueous solutions were determined aiming at saturation conditions as a manner to enhance osmotic dehydration processes. Solubility was initially determined, indicating temperature had a greater influence in the maltitol solubility than in the sucrose. Because of this reason, the thermophysical properties – except viscosity – of the resulting saturated solutions of maltitol showed higher variations with temperature than the sucrose solutions. Density, specific heat and thermal conductivity showed to be more affected by the increase in the solute concentration at higher temperatures by the temperature itself. It resulted in an overall increase for density and decrease for specific heat and thermal conductivity with increasing temperature. When combining such effects, increasing thermal diffusivities of both solutions were observed when increasing temperature. For the specific case of

viscosity, saturated sucrose solutions were more subjected to effects of temperature because saturated maltitol solutions have a greater effect of solute concentration, which not also softened the temperature effect but also made the viscosity to increase with increasing temperature. Polynomial and exponential models were able to accurately fit the thermophysical properties. In spite of some differences, comparable transport properties could be found in the range of ~300-330 K for both solutions, which allow sharing the same industrial facilities to process the different conventional and alternative sweeteners saturated solutions.

6.5. Acknowledgement

This research was funded by Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel – CAPES (Grants: Code 001; 88887.468140/2019-00) and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq, Brazil) for funding the productivity grants of P.E.D. Augusto (310839/2020-3) and J. Telis-Romero (308567/2017-0).

6.6. References

- 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**, v. 34, p. 29–43, 2016.
- ALARCÓN, Á. L.; ORJUELA, A.; NARVÁEZ, P. C.; CAMACHO, E. C. Thermal and Rheological Properties of Juices and Syrups during Non-centrifugal Sugar Cane (*Jaggery*) Production. **Food and Bioproducts Processing**, v. 121, p. 76–90, 2020.
- ALLALI, H.; MARCHAL, L.; VOROBIEV, E. Effects of vacuum impregnation and ohmic heating with citric acid on the behaviour of osmotic dehydration and structural changes of apple fruit. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 1, p. 6–13, 2010.
- AMAMI, E.; KHEZAMI, W.; MEZRIGUI, S.; BADWAIK, L. S.; BEJAR, A. K.; PEREZ, C. T.; KECHAOU, N. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 36, p. 286–300, 2017.
- ARCHER, D. G. Thermodynamic Properties of Synthetic Sapphire (α -Al₂O₃), Standard Reference Material 720 and the Effect of Temperature-Scale Differences on

Thermodynamic Properties. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 22, n. 6, p. 1441–1453, 1993.

ASSIS, F. R.; MORAIS, R. M. S. C.; MORAIS, A. M. M. B. Mathematical Modelling of Osmotic Dehydration Kinetics of Apple Cubes. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 3, p. 1–16, 2017.

ASSIS, M. M. M.; DA SILVA LANNES, S. C.; TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Influence of temperature and concentration on thermophysical properties of yellow mombin (*Spondias mombin*, L.). **European Food Research and Technology**, v. 223, n. 5, p. 585–593, 2006.

ASTM. **American society for testing and materials**. ASTM ed. West Conshohocken: ASTM, 2005.

ASTOLFI-FILHO, Z.; MINIM, L. A.; TELIS-ROMERO, J.; MINIM, V. P.; TELIS, V. R. Thermophysical properties of industrial sugar cane juices for the production of bioethanol. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 55, n. 3, p. 1200–1203, 2010.

AYENEW, Z.; PURI, V.; KUMAR, L.; BANSAL, A. K. Trends in pharmaceutical taste masking technologies: A Patent Review. **Recent Patents on Drug Delivery & Formulation**, v. 3, n. 1, p. 26–39, 2009.

BAGHBANBASHI, M.; PAZUKI, G. A new hydrogen bonding local composition based model in obtaining phase behavior of aqueous solutions of sugars. **Journal of Molecular Liquids**, v. 195, p. 47–53, 2014.

BANIPAL, P. K.; BANIPAL, T. S.; LARK, B. S.; AHLUWALIA, J. C. Partial molar heat capacities and volumes of some mono-, di- and tri-saccharides in water at 298.15, 308.15 and 318.15 K. **Journal of the Chemical Society - Faraday Transactions**, v. 93, n. 1, p. 81–87, 1997.

BARMAN, N.; BADWAIK, L. S. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (*Averrhoa carambola* L.) slices during osmotic dehydration. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 37–44, 2017.

BENSOUISSI, A.; ROGE, B.; MATHLOUTHI, M. Effect of conformation and water interactions of sucrose, maltitol, mannitol and xylitol on their metastable zone width and ease of nucleation. **Food Chemistry**, v. 122, n. 2, p. 443–446, 2010.

BIALIK, M.; WIKTOR, A.; WITROWA-RAJCHERT, D.; GONDEK, E. The influence of osmotic dehydration conditions on drying kinetics and total carotenoid content of kiwiberry (*Actinidia Arguta*). **International Journal of Food Engineering**, v. 16, n. 1–2, 2020.

BOUCHARD, A.; HOFLAND, G. W.; WITKAMP, G. J. Properties of sugar, polyol, and polysaccharide water-ethanol solutions. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 52, n. 5, p. 1838–1842, 2007.

BOZKIR, H.; ERGUN, A. R.; SERDAR, E.; METIN, G.; BAYSAL, T. Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 54, p. 135–141, 2019.

BROWN, B. R.; ZIEMER, S. P.; NIEDERHAUSER, T. L.; WOOLLEY, E. M. Apparent molar volumes and apparent molar heat capacities of aqueous D(+)-cellobiose, D(+)-maltose, and sucrose at temperatures from (278.15 to 393.15) K and at the pressure 0.35 MPa. **Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 37, n. 8, p. 843–853, 2005.

BUBNÍK, Z.; KADLEC, P. Sucrose solubility. In: MALTHLOUTHI, M., REISER, P. (Ed.). **Sucrose Properties and Applications**. 1. ed. Boston: Springer US, p. 101–125, 1995.

CARVALHO, G. R.; CHENLO, F.; MOREIRA, R.; TELIS-ROMERO, J. Physicothermal Properties of Aqueous Sodium Chloride Solutions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 38, n. 3, p. 234–242, 2015.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effect of Food Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods. **Food Engineering and Process Applications**, v. 1, p. 93–101, 1986.

CICHOWSKA, J.; WOŹNIAK, L.; FIGIEL, A.; WITROWA-RAJCHERT, D. The influence of osmotic dehydration in polyols solutions on sugar profiles and color changes of apple tissue. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, v. 64, n. 4, p. 530–538, 2020.

DE CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; DE CARVALHO, G. R.; TELIS-ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice

using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. **Food Research International**, v. 105, p. 905–912, 2018.

DE MELLO JR, R. E.; CORRÊA, J. L. G.; LOPES, F. J.; DE SOUZA, A. U.; DA SILVA, K. C. R. Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica* L.). **Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 6, p. 1685–1691, 2019.

DE SOUZA, A. C.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Rheological characterization of suspensions of sucrose crystals in saturated sucrose solutions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, n. 6, p. 992–1009, 2010.

DI GIOACCHINO, M.; BRUNI, F.; RICCI, M. A. Hydration of two artificial sweeteners: Possible relevance for their taste. **Journal of Molecular Liquids**, v. 320, p. 114398, 2020.

DING, S.; PENG, B.; LI, Y.; YANG, J. Evaluation of specific volume, texture, thermal features, water mobility, and inhibitory effect of staling in wheat bread affected by maltitol. **Food Chemistry**, v. 283, p. 123–130, 2019.

EWETUMO, T., BEN FESTUS, K. D. A. Development of an Instrument for Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Tropical Fruit Juice. **American Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 8, n. 2, p. 22–33, 2017.

FERNANDES, F. A.; BRAGA, T. R.; SILVA, E. O.; RODRIGUES, S. Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 4, p. 1793–1800, 2019.

FLOURY, J.; LE BAIL, A.; PHAM, Q. T. A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 1, p. 1–11, 2008.

FONTAN, R. C. I., SAMPAIO, V. S., SOUZA JR, E. C., PEREIRA, R. G., RODRIGUES, L. B., GONÇALVES, G. R. F., GANDOLFI, O. R. R., BONOMO, R. C. F. Composition and thermophysical properties of Malay Rose apple pulp. **International Food Research Journal**, v. 25, n. 3, p. 1067–1073, 2018.

GERMER, S. P.; QUEIROZ, M. R. D.; AGUIRRE, J. M.; BERBARI, S. A.; ANJOS, V. D. Osmotic dehydration of peaches as a function of temperature and concentration of

sucrose syrup. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 161–169, 2011.

HAO, H.; HOU, B.; WANG, J. K.; LIN, G. Effect of solvent on crystallization behavior of xylitol. **Journal of Crystal Growth**, v. 290, n. 1, p. 192–196, 2006.

HEUME, M., RAPAILLE, A. Advances in sweeteners. In: GRENBY, T. H. (Ed.). . **Advances in sweeteners**. 1. ed. London: Blackie Academic & Professional, p. 85–107, 1996.

JAGANNADHA RAO, P. V. K.; DAS, M.; DAS, S. K. Changes in physical and thermo-physical properties of sugarcane, palmyra-palm and date-palm juices at different concentration of sugar. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 4, p. 559–566, 2009.

JAIN, S. K.; VERMA, R. C.; MURDIA, L. K.; JAIN, H. K.; SHARMA, G. P. Optimization of process parameters for osmotic dehydration of papaya cubes. **Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 211–217, 2011.

JARAMILLO-FLORES, M. E.; HERNANDEZ-SANCHEZ, H. Thermal diffusivity of soursop (*Annona muricata* L.) pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 46, n. 2, p. 139–143, 2000.

JIANG, X.; ZHU, C.; MA, Y. Density and viscosity of sorbitol/maltitol in l-ascorbic acid aqueous solutions at $T = (293.15 \text{ to } 323.15) \text{ K}$. **Journal of Molecular Liquids**, v. 188, p. 67–73, 2013.

KOLAROV, K. M., GROMOV, M. A. Universal equation for calculation of thermal conductivity of fruit and vegetable juices and syrups. **Khranit. Promishhl.**, v. 20, n. 10, p. 22–32, 1973.

LAOS, K.; HARAK, M. The viscosity of supersaturated aqueous glucose, fructose and glucose-fructose solutions. **Journal Food Physics**, v. 27, p. 27–30, 2014.

MARTINS, M. J. N.; GUIMARÃES, B.; POLACHINI, T. C.; TELIS-ROMERO, J. Thermophysical properties of carbohydrate solutions: Correlation between thermal and transport properties. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 9, 2020.

MENDONÇA, K.; CORREA, J.; JUNQUEIRA, J.; ANGELIS-PEREIRA, M.; CIRILLO, M. Mass Transfer Kinetics of the Osmotic Dehydration of Yacon Slices with Polyols. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 1, p. e12983, 2017.

MILLER, D. P.; DE PABLO, J. J.; CORTI, H. Thermophysical Properties of Trehalose and Its Concentrated Aqueous Solutions. **Pharmaceutical Research**, v. 14, n. 5, p. 578–590, 1997.

MOSSEL, B.; BHANDARI, B.; D'ARCY, B.; CAFFIN, N. Use of an Arrhenius Model to Predict Rheological Behaviour in some Australian Honeys. **LWT - Food Science and Technology**, v. 33, n. 8, p. 545–552, 2000.

MUKAMA, M.; AMBAW, A.; OPARA, U. L. Thermal properties of whole and tissue parts of pomegranate (*Punica granatum*) fruit. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 13, n. 2, p. 901–910, 2019.

PHINNEY, D. M.; FRELKA, J. C.; HELDMAN, D. R. Composition-Based Prediction of Temperature-Dependent Thermophysical Food Properties: Reevaluating Component Groups and Prediction Models. **Journal of Food Science**, v. 82, n. 1, p. 6–15, 2017.

POLACHINI, T. C.; MULET, A.; CARCEL, J. A.; TELIS-ROMERO, J. Thermophysical properties of dilute acid slurries of cassava bagasse as a function of biomass loading, acid concentration, and temperature. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 40, n. 3, e13543, p. 1–14, 2020.

POLACHINI, T. C.; SATO, A. C. K.; CUNHA, R. L.; TELIS-ROMERO, J. Density and rheology of acid suspensions of peanut waste in different conditions: An engineering basis for bioethanol production. **Powder Technology**, v. 294, p. 168–176, 2016.

PRITHANI, R.; DASH, K. K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 64, p. 102407, 2020.

RAHAMAN, A.; ZENG, X. A.; KUMARI, A.; RAFIQ, M.; SIDDEEG, A.; MANZOOR, M. F.; BALOCH, Z.; AHMED, Z. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 58, p. 1–11, 2019.

RAMYA, V.; JAIN, N. K. A Review on Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: An Integrated Approach. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, p. 1–22, 2021.

- RECONDO, M. P.; ELIZALDE, B. E.; BUERA, M. P. Modeling temperature dependence of honey viscosity and of related supersaturated model carbohydrate systems. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 1, p. 126–134, 2006.
- RIBEIRO, E. F.; POLACHINI, T. C.; CARVALHO, G. R.; ROMERO, J. T.; CABRAL, R. A. F. Thermophysical properties of different olive oils: Evaluating density and rheology through a fluid dynamic approach. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 119, n. 7, p. 1–10, 2017.
- RICE, T.; ZANNINI, E.; K. ARENDT, E.; COFFEY, A. A review of polyols—biotechnological production, food applications, regulation, labeling and health effects. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 12, p. 2034–2051, 2019.
- ROZZI, N. L. Sweet Facts about Maltitol. **Food Product Design**, v. 17, n. 10, p. 1–2, 2007.
- SIMION, A. I.; GRIGORAȘ, C. G.; LACRAMIOARA, R. U. S. U.; DABIJA, A. Modeling of the thermo-physical properties of aqueous sucrose solutions ii. Boiling point, specific heat capacity and thermal conductivity. **Food and Environment Safety Journal**, v. 10, n. 4, p. 49, 2011.
- TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J.; MAZZOTTI, H. B.; GABAS, A. L. Viscosity of Aqueous Carbohydrate Solutions at Different Temperatures and Concentrations. **International Journal of Food Properties**, v. 10, n. 1, p. 185–195, 2007.
- WANG, S.; ZHANG, Y.; ZHANG, J.; WANG, S.; TAN, Z.; SHI, Q. Heat capacities and thermodynamic functions of d-ribose and d-mannose. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 133, n. 2, p. 1049–1059, 2018.
- YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 1654–1673, 2012.
- ZACCHI, G.; AXELSSON, A. Economic evaluation of preconcentration in production of ethanol from dilute sugar solutions. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 34, n. 2, p. 223–233, 1989.
- ZAHOOR, I.; MA, K. Mass Transfer Kinetics of Osmotic Dehydration of Pineapple. **Journal of Food Processing & Technology**, v. 8, n. 2, 2017.

Table 6.S1. Solubility of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).

Temperature (K)	Solubility					
	(g of solute·100 g ⁻¹ ·solution)		(moles solute·moles solution ⁻¹)		(moles solute.kg water ⁻¹)	
	Saturated solution		Saturated solution		Saturated solution	
	Sucrose	Maltitol	Sucrose	Maltitol	Sucrose	Maltitol
273.15	64.45 $\pm$ 1.22 ^a	51.89 $\pm$ 0.70 ^b	0.083 $\pm$ 0.007 ^a	0.053 $\pm$ 0.001 ^b	5.30 $\pm$ 0.28 ^a	3.14 $\pm$ 0.06 ^b
278.15	64.90 $\pm$ 0.96 ^a	53.21 $\pm$ 0.53 ^b	0.084 $\pm$ 0.011 ^a	0.056 $\pm$ 0.001 ^b	5.41 $\pm$ 0.23 ^a	3.30 $\pm$ 0.07 ^b
283.15	65.43 $\pm$ 2.75 ^a	54.92 $\pm$ 1.67 ^b	0.086 $\pm$ 0.005 ^a	0.060 $\pm$ 0.004 ^b	5.57 $\pm$ 0.67 ^a	3.54 $\pm$ 0.24 ^b
288.15	66.05 $\pm$ 0.69 ^a	56.84 $\pm$ 0.76 ^b	0.088 $\pm$ 0.008 ^a	0.064 $\pm$ 0.002 ^b	5.69 $\pm$ 0.17 ^a	3.83 $\pm$ 0.12 ^b
293.15	66.74 $\pm$ 1.39 ^a	58.94 $\pm$ 0.94 ^b	0.091 $\pm$ 0.008 ^a	0.070 $\pm$ 0.003 ^b	5.87 $\pm$ 0.36 ^a	4.17 $\pm$ 0.16 ^b
298.15	67.50 $\pm$ 0.87 ^a	60.96 $\pm$ 0.58 ^b	0.094 $\pm$ 0.012 ^a	0.076 $\pm$ 0.002 ^a	6.07 $\pm$ 0.24 ^a	4.54 $\pm$ 0.11 ^b
303.15	68.33 $\pm$ 0.90 ^a	63.08 $\pm$ 0.63 ^b	0.097 $\pm$ 0.012 ^a	0.082 $\pm$ 0.002 ^a	6.31 $\pm$ 0.26 ^a	4.96 $\pm$ 0.13 ^b
308.15	69.22 $\pm$ 0.55 ^a	65.25 $\pm$ 0.58 ^b	0.100 $\pm$ 0.008 ^a	0.089 $\pm$ 0.002 ^a	6.57 $\pm$ 0.17 ^a	5.45 $\pm$ 0.14 ^b
313.15	70.18 $\pm$ 2.45 ^a	67.32 $\pm$ 2.35 ^a	0.105 $\pm$ 0.002 ^a	0.098 $\pm$ 0.009 ^a	6.92 $\pm$ 0.84 ^a	6.01 $\pm$ 0.62 ^a
318.15	71.18 $\pm$ 1.47 ^a	69.28 $\pm$ 0.38 ^a	0.110 $\pm$ 0.016 ^a	0.106 $\pm$ 0.002 ^a	7.23 $\pm$ 0.50 ^a	6.55 $\pm$ 0.12 ^a
323.15	72.23 $\pm$ 1.67 ^a	71.24 $\pm$ 0.96 ^a	0.114 $\pm$ 0.011 ^a	0.115 $\pm$ 0.005 ^a	7.62 $\pm$ 0.61 ^a	7.20 $\pm$ 0.33 ^a
328.15	73.31 $\pm$ 0.00 ^a	73.08 $\pm$ 2.76 ^a	0.120 $\pm$ 0.011 ^a	0.125 $\pm$ 0.016 ^a	8.03 $\pm$ 0.00 ^a	7.96 $\pm$ 1.14 ^a
333.15	74.42 $\pm$ 0.30 ^a	74.97 $\pm$ 0.08 ^b	0.126 $\pm$ 0.011 ^a	0.135 $\pm$ 0.000 ^a	8.50 $\pm$ 0.13 ^a	8.70 $\pm$ 0.03 ^a
338.15	75.56 $\pm$ 2.71 ^a	76.82 $\pm$ 3.51 ^a	0.135 $\pm$ 0.026 ^a	0.150 $\pm$ 0.024 ^a	9.14 $\pm$ 1.42 ^a	9.81 $\pm$ 1.85 ^a
343.15	76.70 $\pm$ 2.87 ^a	78.56 $\pm$ 1.47 ^a	0.142 $\pm$ 0.025 ^a	0.161 $\pm$ 0.011 ^a	9.74 $\pm$ 1.58 ^a	10.68 $\pm$ 0.89 ^a
348.15	77.62 $\pm$ 1.95 ^a	80.25 $\pm$ 3.82 ^a	0.148 $\pm$ 0.020 ^a	0.179 $\pm$ 0.034 ^a	10.20 $\pm$ 1.14 ^a	12.16 $\pm$ 2.74 ^a
353.15	78.61 $\pm$ 0.42 ^a	81.87 $\pm$ 2.27 ^a	0.154 $\pm$ 0.013 ^a	0.193 $\pm$ 0.023 ^a	10.74 $\pm$ 0.27 ^a	13.27 $\pm$ 1.89 ^a

Different letters in the same temperature indicate significant differences according to analysis of variance and post hoc Tukey's test ($\alpha = .05$).

Table 6.S2. Density of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).

Temperature (K)	Density (kg·m⁻³)	
	Saturated solution Sucrose	Maltitol
273.15	1205 $\pm$ 5 ^a	1155 $\pm$ 6 ^b
278.15	1208 $\pm$ 1 ^a	1163 $\pm$ 2 ^b
283.15	1211 $\pm$ 4 ^a	1161 $\pm$ 2 ^b
288.15	1212 $\pm$ 2 ^a	1174 $\pm$ 7 ^b
293.15	1216 $\pm$ 5 ^a	1178 $\pm$ 3 ^b
298.15	1218 $\pm$ 6 ^a	1184 $\pm$ 4 ^b
303.15	1223 $\pm$ 2 ^a	1191 $\pm$ 3 ^b
308.15	1224 $\pm$ 7 ^a	1198 $\pm$ 2 ^b
313.15	1228 $\pm$ 1 ^a	1205 $\pm$ 1 ^b
318.15	1229 $\pm$ 0 ^a	1210 $\pm$ 4 ^b
323.15	1233 $\pm$ 6 ^a	1221 $\pm$ 1 ^b
328.15	1238 $\pm$ 3 ^a	1217 $\pm$ 1 ^b
333.15	1238 $\pm$ 9 ^a	1228 $\pm$ 1 ^a
338.15	1237 $\pm$ 2 ^a	1229 $\pm$ 5 ^a
343.15	1241 $\pm$ 3 ^a	1240 $\pm$ 1 ^a
348.15	1242 $\pm$ 8 ^a	1243 $\pm$ 8 ^a
353.15	1243 $\pm$ 5 ^a	1247 $\pm$ 3 ^a

Different letters in the same temperature indicate significant differences according to analysis of variance and post hoc Tukey's test ($\alpha = .05$).

Table 6.S3. Viscosity of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).

Viscosity (Pa·s)		
Temperature	Saturated solution	
(K)	Sucrose	Maltitol
273.15	0.36 $\pm$ 0.002 ^a	0.059 $\pm$ 0.0003 ^b
278.15	0.31 $\pm$ 0.003 ^a	0.060 $\pm$ 0.0004 ^b
283.15	0.27 $\pm$ 0.007 ^a	0.059 $\pm$ 0.001 ^b
288.15	0.24 $\pm$ 0.004 ^a	0.0604 $\pm$ 0.0004 ^b
293.15	0.21 $\pm$ 0.003 ^a	0.0603 $\pm$ 0.001 ^b
298.15	0.18 $\pm$ 0.002 ^a	0.062 $\pm$ 0.0007 ^b
303.15	0.16 $\pm$ 0.002 ^a	0.0640 $\pm$ 0.0002 ^b
308.15	0.14 $\pm$ 0.0004 ^a	0.067 $\pm$ 0.0000 ^b
313.15	0.12 $\pm$ 0.001 ^a	0.068 $\pm$ 0.0006 ^b
318.15	0.11 $\pm$ 0.002 ^a	0.076 $\pm$ 0.0003 ^b
323.15	0.10 $\pm$ 0.002 ^a	0.079 $\pm$ 0.0003 ^b
328.15	0.09 $\pm$ 0.002 ^a	0.087 $\pm$ 0.001 ^b
333.15	0.08 $\pm$ 0.0001 ^a	0.091 $\pm$ 0.003 ^b
338.15	0.083 $\pm$ 0.002 ^a	0.11 $\pm$ 0.0001 ^b
343.15	0.076 $\pm$ 0.0009 ^a	0.12 $\pm$ 0.0008 ^b
348.15	0.074 $\pm$ 0.0002 ^a	0.13 $\pm$ 0.004 ^b
353.15	0.072 $\pm$ 0.0003 ^a	0.16 $\pm$ 0.0005 ^b

Different letters in the same temperature indicate significant differences according to analysis of variance and post hoc Tukey's test ($\alpha = .05$).

Table 6.S4. Specific heat of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).

Specific heat ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		
Temperature	Saturated solution	
(K)	Sucrose	Maltitol
273.15	1.71 ± 0.01^a	2.09 ± 0.02^b
278.15	1.68 ± 0.004^a	2.07 ± 0.01^b
283.15	1.64 ± 0.03^a	2.00 ± 0.02^b
288.15	1.65 ± 0.01^a	1.95 ± 0.04^b
293.15	1.58 ± 0.01^a	1.83 ± 0.02^b
298.15	1.57 ± 0.004^a	1.77 ± 0.02^b
303.15	1.53 ± 0.02^a	1.68 ± 0.01^b
308.15	1.49 ± 0.01^a	1.60 ± 0.02^b
313.15	1.45 ± 0.01^a	1.51 ± 0.02^b
318.15	1.40 ± 0.03^a	1.42 ± 0.01^a
323.15	1.37 ± 0.01^a	1.36 ± 0.01^b
328.15	1.29 ± 0.01^a	1.28 ± 0.02^a
333.15	1.26 ± 0.01^a	1.20 ± 0.02^b
338.15	1.18 ± 0.02^a	1.13 ± 0.02^b
343.15	1.17 ± 0.01^a	1.05 ± 0.01^b
348.15	1.12 ± 0.002^a	0.99 ± 0.02^b
353.15	1.07 ± 0.01^a	0.91 ± 0.01^b

Different letters in the same temperature indicate significant differences according to analysis of variance and post hoc Tukey's test ($\alpha = .05$).

Table 6.S5. Thermal conductivity of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).

Thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		
Temperature	Saturated solution	
(K)	Sucrose	Maltitol
273.15	0.39 ± 0.002^a	0.41 ± 0.003^b
278.15	0.39 ± 0.002^a	0.41 ± 0.003^b
283.15	0.39 ± 0.010^a	0.40 ± 0.004^a
288.15	0.39 ± 0.002^a	0.40 ± 0.002^b
293.15	0.39 ± 0.002^a	0.39 ± 0.001^b
298.15	0.39 ± 0.001^a	0.39 ± 0.003^a
303.15	0.39 ± 0.004^a	0.38 ± 0.001^a
308.15	0.39 ± 0.001^a	0.38 ± 0.003^a
313.15	0.39 ± 0.001^a	0.38 ± 0.001^b
318.15	0.38 ± 0.007^a	0.38 ± 0.003^a
323.15	0.38 ± 0.004^a	0.37 ± 0.003^a
328.15	0.38 ± 0.004^a	0.37 ± 0.001^b
333.15	0.38 ± 0.007^a	0.37 ± 0.004^a
338.15	0.38 ± 0.008^a	0.37 ± 0.002^a
343.15	0.38 ± 0.010^a	0.36 ± 0.003^a
348.15	0.38 ± 0.002^a	0.36 ± 0.001^b
353.15	0.38 ± 0.004^a	0.36 ± 0.002^b

Different letters in the same temperature indicate significant differences according to analysis of variance and post hoc Tukey's test ($\alpha = .05$).

Table 6.S6. Thermal diffusivity of saturated solutions of sucrose and maltitol at different temperatures (average $\pm$ standard deviation).

Thermal diffusivity ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		
Temperature	Saturated solution	
(K)	Sucrose	Maltitol
273.15	1.89 ± 0.009^a	1.69 ± 0.02^b
278.15	1.91 ± 0.004^a	1.69 ± 0.02^b
283.15	1.95 ± 0.03^a	1.70 ± 0.04^b
288.15	1.94 ± 0.001^a	1.75 ± 0.06^b
293.15	2.02 ± 0.006^a	1.83 ± 0.02^b
298.15	2.03 ± 0.01^a	1.86 ± 0.03^b
303.15	2.06 ± 0.02^a	1.90 ± 0.01^b
308.15	2.12 ± 0.009^a	2.00 ± 0.04^b
313.15	2.16 ± 0.008^a	2.08 ± 0.03^b
318.15	2.22 ± 0.006^a	2.23 ± 0.03^a
323.15	2.26 ± 0.04^a	2.26 ± 0.04^a
328.15	2.39 ± 0.01^a	2.36 ± 0.03^a
333.15	2.45 ± 0.05^a	2.50 ± 0.06^a
338.15	2.60 ± 0.004^a	2.70 ± 0.04^b
343.15	2.61 ± 0.07^a	2.78 ± 0.05^b
348.15	2.72 ± 0.03^a	2.95 ± 0.09^b
353.15	2.84 ± 0.05^a	3.20 ± 0.05^b

Different letters in the same temperature indicate significant differences according to analysis of variance and post hoc Tukey's test ($\alpha = .05$).

7. CAPÍTULO 4

Estudo comparativo do efeito da agitação mecânica e da aplicação de ultrassom na cinética de desidratação osmótica de gengibre (Zingiber officinale) em soluções saturadas de maltitol

Maria Julia Neves Martins ¹; Marcio Augusto Ribeiro Sanches ¹; Tiago Carregari Polachini ¹; Javier Telis-Romero ¹

¹ Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Campus São José do Rio Preto, São Paulo, 15054-000, Brazil.

Resumo: O gengibre desidratado é uma das principais formas de consumo do gengibre. A desidratação osmótica é capaz de estender sua vida útil, mantendo o seu sabor pungente característico e suas propriedades nutraceuticas. Porém, o processo convencional demanda um tempo longo. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação do ultrassom em comparação com a agitação mecânica na cinética de desidratação osmótica de gengibre. Para isso, utilizou-se soluções saturadas de maltitol nas temperaturas de 25, 35 e 45 °C. Três tratamentos foram realizados, desidratação osmótica convencional (OD), com agitação mecânica (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD). As taxas de perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG) foram maiores para as 5 primeiras horas para os diferentes métodos testados, seguido de uma redução gradativa até atingir equilíbrio. O tratamento USOD apresentou maior perda de água (WL: 24 %) e ganho de sólidos (SG: 12 %), seguido dos tratamentos AGOD (WL: 22 % e SG: 11 %) e OD (WL: 21 % e SG: 10 %). Ao empregar maiores temperaturas de processamento, evidenciou-se maior perda de água e ganho de sólidos em todos os tratamentos. Portanto, o emprego do ultrassom na desidratação osmótica com soluções saturadas é eficiente para intensificar os processos de redução de umidade e incorporação de polióis em gengibre.

Palavras-chave: Poliol. Solução saturada. Cavitação. Transferência de massa. Intensificação de processo.

7.1. Introdução

O gengibre (*Zingiber officinale*) é uma planta perene, sendo o rizoma a parte de maior interesse. Ele é caracterizado como um caule subterrâneo, espesso e de estrutura rígida (WHO, 1999). O óleo essencial presente no gengibre é responsável por seu sabor característico de pungência. Ele contém teores significativos de compostos bioativos, principalmente 6-gingerol e 6-shogaol, com propriedades anti-inflamatórias, antitumorigênicos, antidiabética, antiobesidade e cardioprotetora (SHUKLA; GOUD; DAS, 2019; SRINIVASAN, 2017). No entanto, seu alto teor de umidade em torno de 78% (USDA, 2018) dificulta a sua estabilidade pós-colheita de modo a garantir o adequado transporte e abastecimento em regiões distantes. Por essa razão, estima-se que 70% do consumo do gengibre ocorra na forma desidratada devido à maior facilidade de transporte, armazenamento, e de sua própria aplicação como ingredientes em diversos produtos (SHUKLA; GOUD; DAS, 2019).

A secagem convectiva é uma técnica de desidratação convencional de baixo custo associado, porém apresenta algumas desvantagens como longo tempo de processamento, alterações na qualidade final do produto relacionadas a exposição às altas temperaturas – resultando em perdas na cor, textura, encolhimento e degradação de nutrientes, entre outras (WOJDYŁO et al., 2014). A desidratação osmótica, por outro lado, é uma técnica de desidratação parcial do alimento que é muitas vezes utilizada como pré-tratamento à secagem, reduzindo o tempo de exposição ao ar quente e o gasto energético, melhorando os atributos sensoriais e prolongando a vida útil dos alimentos (JIANG et al., 2021). Além disso, a desidratação osmótica possibilita desenvolver novos produtos alimentícios incorporados de diferentes solutos com valor tecnológico agregado (PALACIOS ROMERO et al., 2022).

Devido ao gradiente de concentração entre o alimento e a solução osmótica, é gerada uma força motriz que promove a transferência de massa até atingir o equilíbrio. Nesse momento, ocorre a saída da água do produto para a solução osmótica e impregnação de soluto na matriz sólida. As soluções osmóticas mais tradicionalmente empregadas são constituídas de sacarose e de cloreto de sódio, prevalecendo o uso de sacarose para frutas e cloreto de sódio para vegetais (LEWICKI; LENART, 2014). Entretanto, devido às exigências dos consumidores por produtos com redução calórica e pelo efeito negativo do excesso de consumo de açúcar relatado pela OMS (Organização Mundial da Saúde) (LUSTIG; SCHMIDT; BRINDIS, 2012), novos agentes osmóticos estão sendo testados. O maltitol é um dos exemplos de agentes osmóticos que vem

sendo utilizado em substituição à sacarose. Ele é definido como um poliol dissacarídeo ou álcoois de açúcar – popularmente conhecido como edulcorante – com poder de doçura 80-90% comparável à sacarose. Tratando-se do gengibre, muitas vezes empregado como produto com fins nutracêuticos, o emprego de soluções osmótica de polióis vai de encontro com a necessidade de produzir um alimento de baixo teor calórico. Embora haja uma variedade de edulcorantes (sorbitol, xilitol, eritritol, manitol, etc), o maltitol se destaca por ter propriedades como peso molecular, solubilidade, ponto de fusão e umidade de equilíbrio próximas a sacarose (MITCHELL, 2007). Vários estudos de desidratação osmótica utilizaram o maltitol como agente osmótico em alimentos como maçã (KOWALSKA et al., 2020), kiwi (*Actinidia Arguta*) (BIALIK et al., 2020), yacon (MENDONÇA et al., 2016), entre outros (MITCHELL, 2007).

Embora o maltitol apresente propriedades semelhante a sacarose, a concentração e o tipo de agente osmótico influenciam a transferência de massa durante a desidratação osmótica (RAHAMAN et al., 2019). Estudos prévios do nosso grupo de pesquisa relataram a proximidade das propriedades termofísicas de soluções saturadas de sacarose e maltitol para o emprego como soluções osmóticas na condição de saturação (MARTINS et al., 2021). Além de apresentarem propriedades de transporte similares, trabalhar com a solução no limite da saturação intensifica o gradiente de potencial químico e a transferência de massa. Por outro lado, como apresentam densidade e viscosidade mais altas, a resistência externa deve ser vencida pela inserção de turbulência ao sistema e redução das zonas de estagnação ao redor do alimento.

A agitação mecânica é uma alternativa simples utilizada na desidratação osmótica como forma de causar transferências de massa mais intensas (AMAMI; VOROBIEV; KECHAOU, 2006). Por outro lado, o uso do ultrassom durante a desidratação osmótica é técnica emergente que traz várias condições benéficas, como potencializar a transferência de massa, melhorando suas propriedades funcionais e tecnológicas e mantendo a biodisponibilidade dos componentes alimentares (GALANAKIS, 2021). É considerada uma tecnologia não térmica desde que tenha um controle de temperatura e é capaz de promover intensificação da transferência de massa devido aos mecanismos diretos na matriz alimentícia e indiretos na interface sólido-líquido. Entre eles, destaque-se a microagitação, microfluxo, alteração de pressão, redução da camada limite, cavitação e efeito esponja (KROEHNKE et al., 2021).

Modelos matemáticos geralmente são aplicados em estudos de desidratação osmótica com objetivo de obter equações que descrevem o processo de transferência de

massa (MALDONADO; GONZÁLEZ PACHECO, 2022) e prever o comportamento em diferentes condições de processamento, porém dentro da faixa estudada. Modelos matemáticos empíricos de Peleg (PELEG, 1988), Weibull (CUNHA et al., 2001) e Zugarramurdi e Lupín (ZUGARRAMURDI & LUPÍN, 1980) são utilizados em estudos de desidratação osmótica (SULISTYAWATI et al., 2020; ZÚÑIGA; PEDRESCHI, 2012). O modelo de Fick é uma alternativa para modelar a transferência de massa obtendo os coeficientes de difusão de água e sólidos para materiais biológicos e alimentos (MALDONADO; GONZÁLEZ PACHECO, 2022; MERCALI et al., 2011; TELIS; MURARI; YAMASHITA, 2004).

Estudos de desidratação osmótica de gengibre estão apresentados na literatura, porém empregando diferentes tecnologias intensificadoras, soluções osmóticas e condições de processamento. Dash, Balasubramaniam e Kamat (2019) utilizaram alta pressão e soluções ternárias de sacarose e cloreto de sódio para desidratação de amostras gengibre. Osaie et al. (2019) utilizou banho ultrassônico com solução de sacarose para o mesmo fim, enquanto AN et al. (2019) comparou a desidratação osmótica a vácuo pulsado e desidratação osmótica assistida por ultrassom utilizando solução ternária de sacarose e cloreto de sódio. Como visto, até o nosso conhecimento, não há trabalhos na literatura que relatam a utilização de soluções saturadas de maltitol combinadas com ultrassom de potência na cinética de desidratação osmótica de gengibre. Com isso, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da agitação mecânica (AG) e da aplicação do ultrassom (US) sobre a cinética de perda de água (WL) e de ganho de sólidos (SG) durante a desidratação osmótica de gengibre ao empregar soluções saturadas de maltitol.

7.2. Material e Métodos

7.2.1. Matéria-prima

Amostras íntegras e homogêneas de gengibre (*Zingiber officinale*) ($78,38 \pm 0,22\%$ de água, $1,82 \pm 0,01\%$ de proteína, $0,75 \pm 0,01\%$ de gordura, $16,28 \pm 0,22\%$ de carboidratos, $2,00 \pm 0,02$ de fibras e $0,78 \pm 0,01\%$ de cinzas) foram adquiridas no mercado local de São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. Após serem adquiridos, os produtos foram higienizados com água corrente e em seguida secos com papel absorvente. O gengibre foi fatiado no sentido do comprimento poucos instantes antes do início dos experimentos com o auxílio de um fatiador elétrico. Em sequência, o

gingibre foi cortado no formato de placa com auxílio de um molde de inox com dimensão de 3,3 cm de comprimento, 3,3 cm de largura e $0,4 \pm 0,05$ cm de espessura.

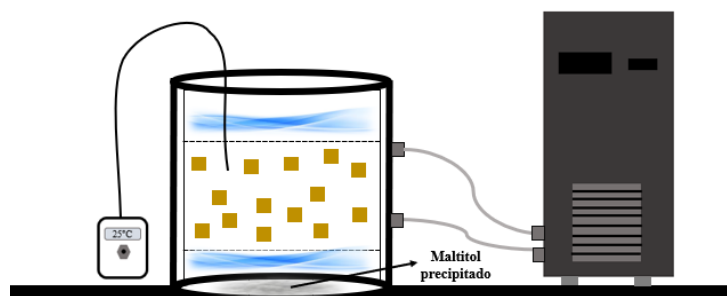
7.2.2. Preparação da solução osmótica

As soluções saturadas foram preparadas usando água destilada e maltitol de grau alimentício, em temperaturas de 25 °C (67,50 g de soluto/100 g de solução), 35°C (69,22 g de soluto/g de solução) e 45 °C (71,18 g de soluto/g de solução). A saturação foi garantida pelos dados de solubilidade e pela formação de precipitado conforme a metodologia reportada em Martins et al. (2021).

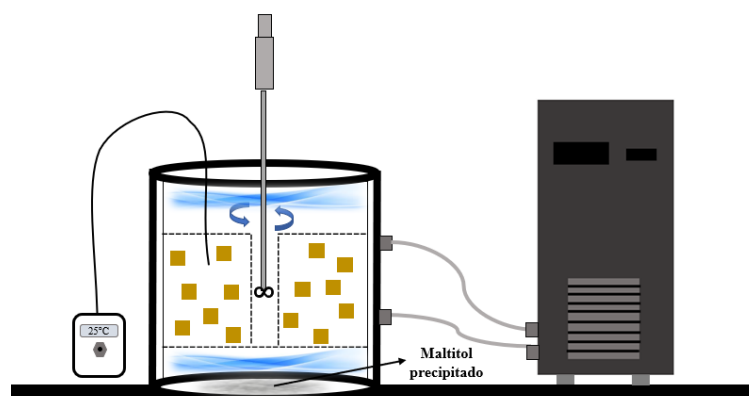
A solução osmótica foi colocada em uma cuba encamisada de aço inox (24 cm de altura e 15 cm de diâmetro) acoplada a um banho termostático (modelo MA-184, Marconi, Brasil) com circulação de água para a estabilização da temperatura (25, 35 e $45 \pm 1^\circ\text{C}$) conforme apresentado na Figura 7.1. Um termopar tipo K (MT-455, Minipa, EUA) foi posicionado no interior da cuba para monitorar a temperatura durante o processo. A concentração da solução ao longo do experimento foi monitorada por um refratômetro portátil (HI 86801, Hanna Instruments, Romênia) para garantir a condição de saturação durante todo o processo.

Figura 7.1. Aparato experimental utilizado para a desidratação osmótica a) convencional (OD); b) agitada mecanicamente (AGOD); e c) assistida por ultrassom (USOD).

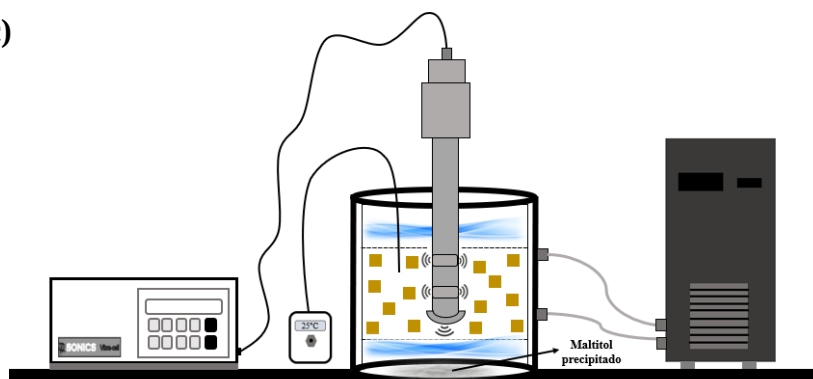
a)



b)



c)



7.2.3. Desidratação osmótica

As amostras de gengibre foram inseridas dentro da cuba e posicionadas entre duas grades plásticas para ficarem submersas na solução durante todo o experimento. Foi utilizada uma proporção de 1:47 (massa/massa) de gengibre e solução saturada de maltitol, respectivamente para evitar a diluição da solução.

A desidratação osmótica convencional (OD), com agitação mecânica e com ultrassom foi realizada conforme apresentado na Figura 7.1-a, 7.1-b e 7.1-c, respectivamente. Os ensaios foram realizados com duração total de 24 h, retirando amostras nos tempos 0; 1; 2; 3; 4; 4.5; 6; 7; 8.5; 10; 12; 15; 18; 22 e 24 horas para avaliação do processo em função do tempo.

Para a desidratação osmótica com agitação mecânica (AGOD), foi acoplado ao aparato experimental um agitador mecânico (Heidolph RZR1; Heidolph Instruments GMBH & Co., Schwabach, Alemanha) conforme apresentado na Figura 7.1-b. O equipamento foi posicionado no centro da cuba com velocidade ajustada a 100 rpm, após teste preliminar.

Para a desidratação osmótica assistida por ultrassom (USOD) foi acoplado ao aparato experimental um processador ultrassônico modelo Vibra-Cell VCX-1500 (Sonics & Materials, Newton, EUA), com uma sonda de 25 mm de diâmetro contendo 3 “nós” para emissão das ondas ultrassônicas. A frequência do ultrassom foi de 20 kHz, potência nominal de 700 W e sistema pulsado (1 s on; 4 s off). O equipamento foi posicionado no centro do recipiente entre as amostras conforme apresentado na Figura 7.1c. A temperatura do sistema foi mantida constante através da circulação de água de um banho termostático (modelo MA-184, Marconi, Brasil) no lado encamisado da cuba.

7.2.4. Determinação da perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG) durante a desidratação osmótica

Após os tempos pré-estabelecidos de desidratação osmótica, amostras de gengibre foram retiradas do recipiente, escorridas em uma peneira e mergulhada em um béquer com água destilada a $\approx 3^{\circ}\text{C}$ por 30 segundos. A seguir, elas eram dispostas sobre papel absorvente para a retirada do excesso de água. O intuito do enxágue da amostra é retirar o excesso de solução osmótica da superfície e cessar o processo de desidratação osmótica. Em seguida, foi determinada a perda de água (WL) (Equação 7.1) e o ganho de sólidos (SG) (Equação 7.2) conforme Ganjloo et al. (2012).

$$WL (\%) = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_0} \times 100 \quad (7.1)$$

$$SG (\%) = \frac{m - m_0}{M_0} \times 100 \quad (7.2)$$

em que WL é a perda de água (%), SG é o ganho de sólidos, M_0 é o peso da amostra inicial $t=0$ (g), M é o peso da amostra no tempo t (g), m_0 é massa de sólidos secos inicial $t=0$ (g) e m é massa de sólidos secos no tempo t (g).

7.2.5. Modelagem matemática da cinética de WL e SG na desidratação osmótica

Os dados experimentais de perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG) da desidratação osmótica de gengibre em solução saturada de maltitol em diferentes temperaturas e condições de processamento foram ajustados nos modelos matemáticos de Peleg, Weibull e Zugarramurdi & Lupín. O coeficiente de transferência de massa também foi determinado utilizando o modelo de Fick.

O software Statistica 7.0 (Statsoft Inc., EUA) foi utilizado para realizar as regressões lineares e o ajuste foi avaliado com o coeficiente de determinação (R_{adj}^2) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 7.3).

$$RMSE = \frac{1}{n} [\sum_n (C_{pred} - C_{exp})^2]^{0,5} \quad (7.3)$$

em que C_{exp} e C_{pred} são os resultados experimentais e preditos pelo modelo, e n é o número de valores experimentais.

7.2.5.1. Modelo de Peleg

O modelo de Peleg (1988) é comumente utilizado para descrever processos de transferência de massa, tem por objetivo estimar a umidade de equilíbrio. Esta estimativa é obtida por meio da curva de adsorção, composta pelo parâmetro de ajuste, kw_1 e kw_2 , conforme a Equação 7.4.

$$WS = - \frac{t}{kw_1 + kw_2 t} \quad (7.4)$$

em que WS representa a perda de água (WL) ou ganho de sólidos (SG); t é o tempo da desidratação osmótica; kw_1 e kw_2 são os parâmetros do modelo.

A constante kw_1 representa a taxa inicial ($t=0$) de transferência de massa da WL ou SG (Eq. (7.5)). A constante kw_2 representa a condição de equilíbrio de transferência de massa da WL ou SG, ou seja, quando $t \rightarrow \infty$ (Eq. (7.6)).

$$\left. \frac{d(WS)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{kw_1} \quad (7.5)$$

$$WS^\infty = \frac{1}{kw_2} \quad (7.6)$$

7.2.5.2. Modelo de Weibull

O modelo de Weibull (CUNHA et al., 2001) representado pela Equação (7.7) é comumente utilizado para descrever processos que apresentam variabilidade como de transferência de massa, em que é determinada a cinética de perda de água e do ganho de sólidos durante a desidratação osmótica.

$$\frac{WS}{WS^\infty} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (7.7)$$

em que WS representa a perda de água (WL) ou ganho de sólidos (SG); α é o parâmetro de forma (adimensional); β é o parâmetro de escala (h), que representa a cinética (e o tempo necessário para atingir 63% das condições de equilíbrio; WS^∞ representa a perda de água no equilíbrio (WL^∞) ou o ganho de sólidos no equilíbrio (SG^∞).

7.2.5.3. Modelo de Zugarramurdi & Lupín

O modelo de Zugarramurdi & Lupín (1980) representado pela Equação (7.8) prevê a cinética da desidratação osmótica.

$$WS = WS_0 \exp(-kt) + WS^\infty (1 - \exp(-kt)) \quad (7.8)$$

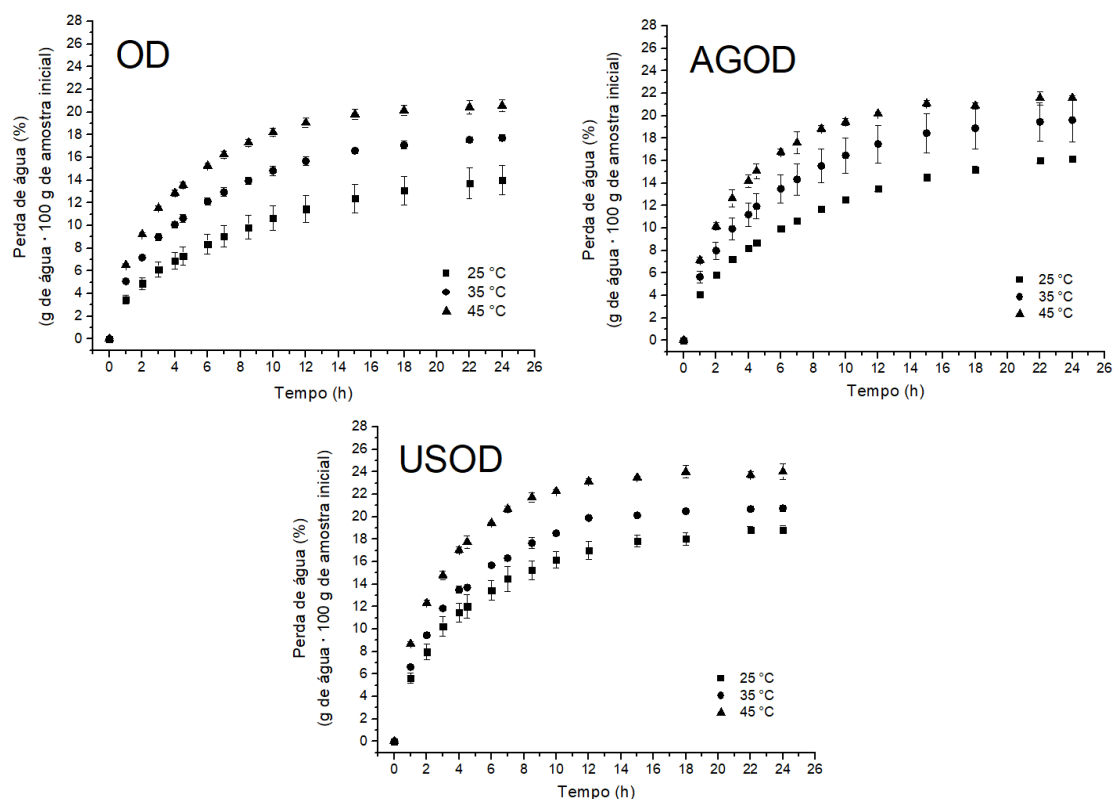
em que WS representa a perda de água (WL) ou ganho de sólidos (SG); WS_0 representa a perda de água inicial ou ganho de sólidos inicial ($t = 0$), respectivamente; k é a parâmetro matemático relacionado a transferência de massa; WS^∞ representa a perda de água ou ganho de sólidos nas condições de equilíbrio.

7.3. Resultados e discussão

7.3.1. Efeito da temperatura do processo durante a desidratação osmótica de gengibre

A umidade inicial do gengibre *in natura* era de $78,38 \pm 0,22$ (g de água / 100 g de amostra). A Figura 7.2 apresenta o efeito da temperatura sobre a perda de água (WL) durante a desidratação osmótica de gengibre nos diferentes processos estudados.

Figura 7.2. Efeito da temperatura sobre a perda de água (WL) do gengibre durante a desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD).



Para todos os tratamentos, as taxas de WL apresentaram comportamento semelhante durante o processo, aumentando com o aumento do tempo de processo. Durante as primeiras 5 horas de processo, foi observado um aumento acentuado da WL nas fatias de gengibre para todos os tratamentos. Esta rápida difusão pode ser atribuída à maior diferença de potencial químico através de uma membrana semi-impermeável entre o material celular e a solução osmótica (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016). Entretanto, após 6 horas há uma redução gradativa da WL. Isso provavelmente está relacionado a resistência externa que é gradualmente desenvolvida devido ao acúmulo de sólidos na membrana semi-impermeável (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016), dificultando a WL do gengibre.

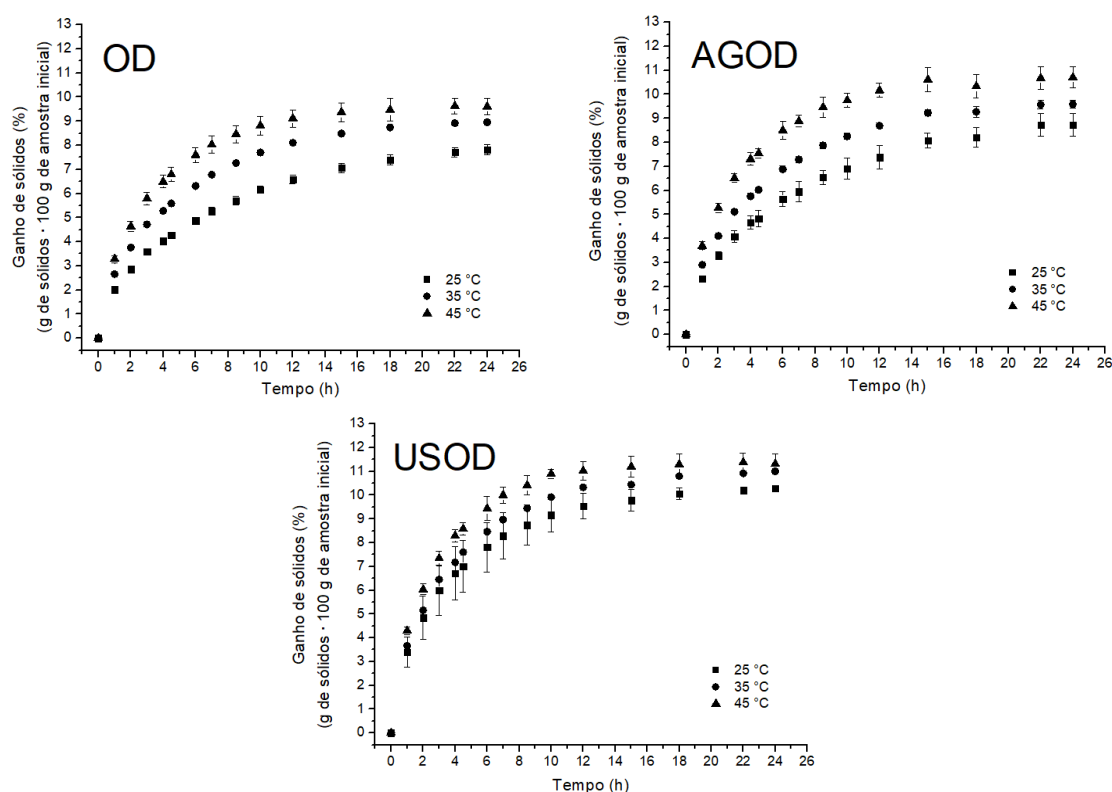
Em relação aos efeitos das diferentes temperaturas de processo, o aumento da temperatura resultou em um aumento da WL no gengibre, independente das condições

avaliadas (OD, AGOD e USOD). Em todas as três condições avaliadas, houve uma maior WL nos processos conduzidos a 45°C, atingindo os valores de 21, 22 e 24% para os tratamentos OD, AGOD e USOD, respectivamente. Os menores valores WL para OD, AGOD e USOD foram obtidas na temperatura de 25 °C.

Similarmente como analisado para WL, a Figura 7.3 mostra o efeito da temperatura sobre o ganho de sólidos (SG) durante a desidratação osmótica de gengibre para os processos estudados.

Em todas as condições (OD, AGOD e USOD), o aumento da temperatura também resultou em aumento do SG no gengibre. Os tratamentos OD, AGOD e USOD, realizados a 25°C, apresentaram um menor SG quando comparados àqueles conduzidos a temperaturas mais altas. Analogamente, as taxas de SG atingiram o percentual de 10, 11 e 12% para os tratamentos OD, AGOD e USOD.

Figura 7.3. Efeito da temperatura sobre o ganho de sólidos (SG) do gengibre durante a desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD).



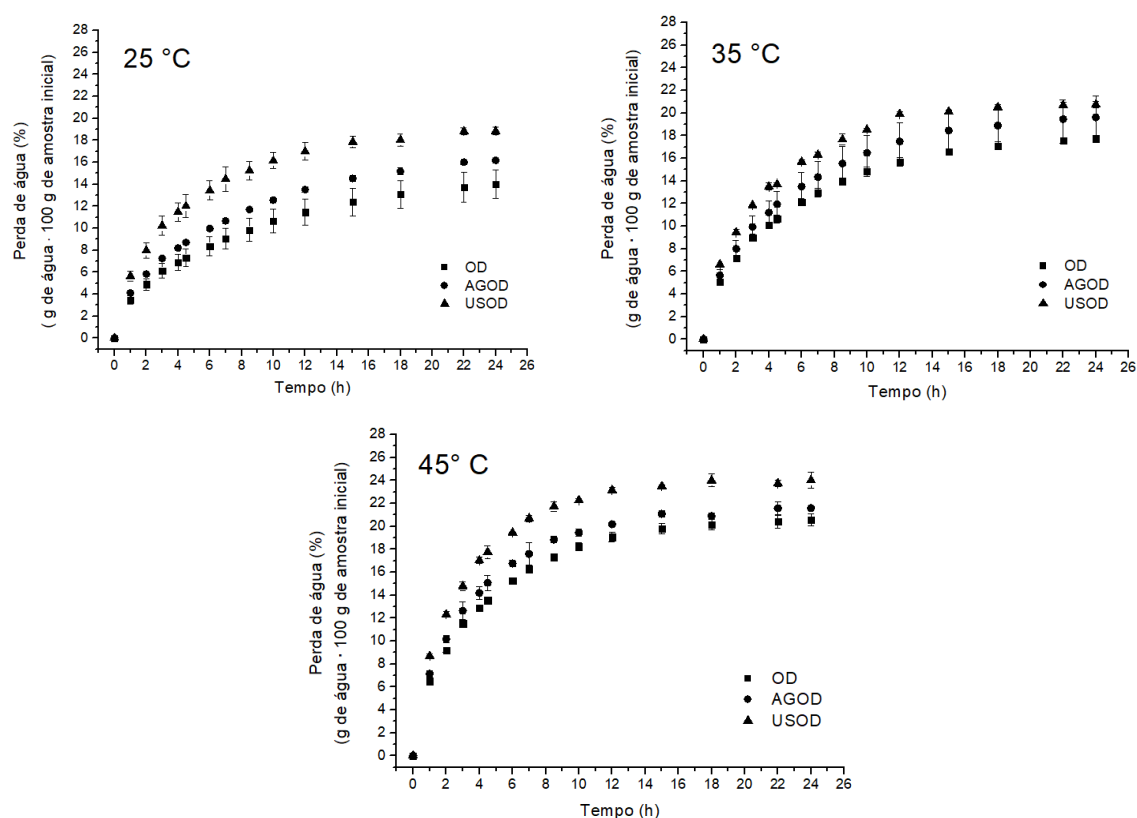
Prithani & Dash (2020) estudaram o efeito da temperatura na desidratação osmótica de kiwi usando solução de sacarose (60 °Brix). Os autores também relataram

que a perda de água aumentou significativamente na medida em que a temperatura do processo aumentou de 25 °C para 60 °C. Esse fenômeno de aumento nas taxas de perda de água com o aumento da temperatura da solução pode ser atribuído ao efeito da temperatura na diminuição da viscosidade da solução osmótica, inchaço das amostras, plastificação da estrutura da membrana celular - promovendo assim uma difusão mais rápida da água dentro do produto (CIURZYŃSKA et al., 2016).

7.3.2. Efeito das tecnologias empregadas

A Figura 7.4 mostra os efeitos da desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD) sobre a WL do gengibre nas diferentes temperaturas de processo estudadas.

Figura 7.4. Efeito da desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD) sobre a WL do gengibre.

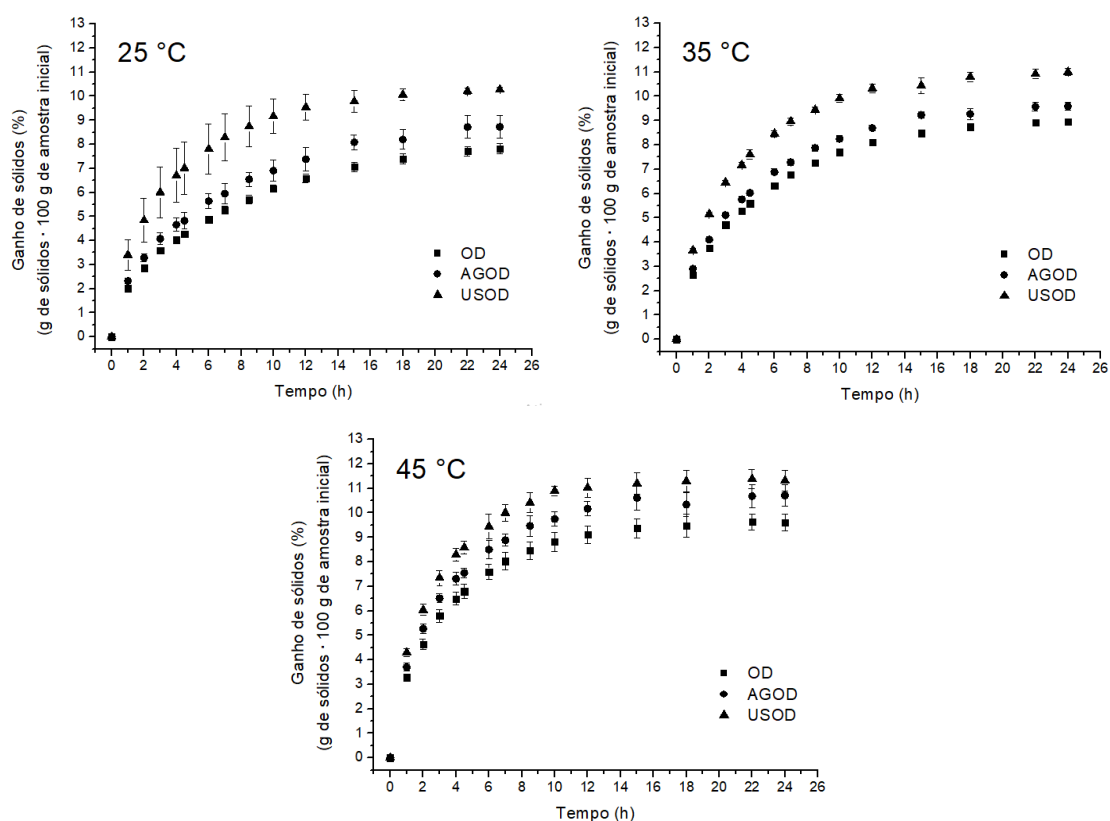


Em todas as temperaturas avaliadas, o processo de desidratação osmótica convencional (OD) causou uma menor WL no gengibre quando comparado aos processos AGOD e USOD. Como esperado, o tratamento USOD resultou em uma

maior WL no gengibre. Comportamento similar foi observado para o SG no gengibre. A Figura 7.5 mostra os efeitos da desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD) sobre o SG do gengibre nas diferentes temperaturas de processo estudadas.

De maneira semelhante a WL, em todas as temperaturas estudadas, OD resultou em um menor SG. O tratamento AGOD apresentou um maior SG, quando comparado ao OD. Provavelmente, as turbulências produzidas pela agitação reduziram a resistência externa, acelerando o transporte de massa (AHMAD-QASEM et al., 2013), impactando diretamente sobre as taxas de WL e SG. Porém, SG ainda maiores foram obtidos durante o tratamento USOD. Os resultados positivos do processamento por ultrassom provavelmente estão ligados aos efeitos combinados do gradiente de pressão osmótica, da cavitação e do efeito esponja (BHARGAVA et al., 2021; CHEN et al., 2020), resultando em maior perda de umidade e ganho de sólidos.

Figura 7.5. Efeito da desidratação osmótica convencional (OD), agitada mecanicamente (AGOD) e assistida por ultrassom (USOD) sobre o SG do gengibre.



A cavitação é o surgimento de bolhas de ar devido a vaporização da água e ao efeito de rarefação ser superior as forças coesivas do líquido. Essas bolhas podem colapsar durante o trajeto proporcionando o aumento da temperatura e pressão pontual (5000 K e 1000 atm) e implodir próximo da interface sólido-líquido gerando micro jatos atingindo a superfície e formando micro canais (CÁRCEL et al., 2012). Já o efeito esponja é caracterizado por sucessivos movimentos de compressão e descompressão provocados diretamente no sólido. Ainda, esses movimentos criam canais microscópicos que facilitam e promovem a transferência de massa entre o sólido e o meio osmótico (CÁRCEL et al., 2012; GALLEGO-JUÁREZ, 1999).

Embora, ambos os processos (AGOD e USOD) possam acelerar a desidratação osmótica convencional (OD) do gengibre, o tratamento USOD pode ser considerado uma técnica mais eficiente para aumentar a transferência de massa e a eficiência do processo.

7.3.3. Modelagem matemática

As Tabelas (7.1), (7.2) e (7.3) apresentam os resultados dos parâmetros matemáticos obtidos na modelagem matemática de perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).

De maneira geral, os três modelos testados apresentaram bons ajustes aos dados experimentais com $R^2 \geq 0,9805$ e $RMSE \leq 0,7123$. Entretanto, o modelo de Weibull foi o que apresentou melhor ajuste com $R^2 \geq 0,9948$ e $RMSE \leq 0,1158$.

Tabela 7.1. Parâmetros do modelo Peleg para perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).

T (°C)	Parâmetros	Perda de água (WL)			Ganho de sólidos (SG)		
		SB	AG	US	SB	AG	US
25	K1	0,221±0,028	0,177±0,003	0,114±0,005	0,349±0,014	0,293±0,014	0,188±0,001
	K2	0,059±0,006	0,051±0,001	0,047±0,001	0,107±0,002	0,097±0,004	0,087±0,001
	R _{adj} ²	≥0,9961	≥0,9963	≥0,9962	≥0,9967	≥0,9969	≥0,9959
	RMSE	0,2608	≤0,307	≤0,3365	≤0,1373	≤0,1471	≤0,1904
35	K1	0,120±0,006	0,108±0,010	0,077±0,001	0,216±0,002	0,192±0,003	0,133±0,002
	K2	0,049±0,000	0,045±0,004	0,043±0,000	0,098±0,001	0,092±0,002	0,083±0,001
	R _{adj} ²	≥0,9969	≤0,9963	≤0,9947	≥0,9960	≤0,9943	≤0,9917
	RMSE	≤0,2972	≤0,3405	≤0,4305	≤0,160	≤0,2037	≤0,2871
45	K1	0,081±0,003	0,069±0,004	0,050±0,002	0,143±0,008	0,125±0,006	0,090±0,007
	K2	0,043±0,01	0,042±0,000	0,038±0,000	0,095±0,003	0,085±0,004	0,078±0,004
	R _{adj} ²	≥0,9941	≥0,9932	≥0,9930	≥0,9944	≥0,9936	≥0,9805
	RMSE	≤0,4414	≤0,5057	≤0,5549	≤0,2106	≤0,2529	≤0,4837

Tabela 7.2. Parâmetros do modelo de Weibull para perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).

T (°C)	Parâmetros	Perda de água (WL)			Ganho de sólidos (SG)		
		SB	AG	US	SB	AG	US
25	B	5,270±0,171	4,783±0,094	3,339±0,097	4,504±0,126	4,169±0,023	3,010±0,022
	A	0,724±0,002	0,734±0,004	0,767±0,003	0,738±0,007	0,745±0,001	0,777±0,005
	XG	15,619±1,417	17,719±0,349	19,287±0,286	8,479±0,174	9,382±0,447	10,468±0,055
	R _{adj} ²	≥0,9990	≥0,9988	≥0,9988	≥0,9992	≥0,9991	≥0,9992
	RMSE	≤0,0533	≤0,0439	≤0,0467	≤0,1157	≤0,1158	≤0,4319
35	B	3,347±0,124	3,313±0,022	2,541±0,034	3,051±0,002	2,890±0,037	2,317±0,005
	A	0,763±0,002	0,764±0,004	0,788±0,003	0,773±0,002	0,785±0,010	0,805±0,012
	XG	18,397±0,189	20,327±1,991	21,106±0,112	9,238±0,103	9,810±0,226	11,019±0,170
	R _{adj} ²	≥0,9992	≥0,9991	≥0,9990	≥0,9993	≥0,9986	≥0,9985
	RMSE	≤0,0362	≤0,0401	≤0,0456	≤0,0177	≤0,0248	≤0,0302
45	B	2,645±0,138	2,364±0,115	1,982±0,081	2,216±0,033	2,158±0,011	1,794±0,026
	A	0,783±0,011	0,792±0,011	0,796±0,020	0,798±0,000	0,803±0,002	0,831±0,029
	XG	21,019±0,572	21,796±0,111	24,138±0,255	9,700±0,362	10,746±0,477	11,881±0,585
	R _{adj} ²	≥0,9989	≥0,9990	≥0,9970	≥0,9995	≥0,9994	≥0,9948
	RMSE	≤0,0480	≤0,0486	≤0,0921	≤0,1424	≤0,0187	≤0,0625

Tabela 7.3. Parâmetros do modelo Z & L para perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG).

T (°C)	Parâmetros	Perda de água (WL)			Ganho de sólidos (SG)		
		SB	AG	US	SB	AG	US
25	XG	14,318±1,335	16,459±0,235	18,536±0,304	7,926±0,191	8,842±0,416	10,127±0,055
	K	0,323±0,005	0,246±0,003	0,138±0,007	0,256±0,004	0,270±0,001	0,345±0,002
	R _{adj} ²	≥0,9841	≥0,9846	≥0,9880	≥0,9853	≥0,9862	≥0,9894
	RMSE	≤0,5638	≤0,6121	≤0,5948	≤0,2784	≤0,3249	≤0,3034
35	XG	17,660±0,223	19,526±1,891	20,580±0,094	8,925±0,102	9,523±0,196	10,800±0,180
	K	0,318±0,009	0,320±0,002	0,399±0,004	0,342±0,000	0,356±0,003	0,432±0,000
	R _{adj} ²	≥0,9987	≥0,9884	≥0,9909	≥0,9893	≥0,9897	≥0,9921
	RMSE	≤0,5626	≤0,6842	≤0,5623	≤0,2712	≤0,2855	≤0,2748
45	XG	20,449±0,500	21,304±0,173	23,695±0,190	9,505±0,358	10,546±0,470	11,735±0,614
	K	0,386±0,016	0,426±0,018	0,500±0,017	0,450±0,006	0,461±0,002	0,546±0,007
	R _{adj} ²	≥0,9897	≥0,9909	≥0,9889	≥0,9926	≥0,9930	≥0,9916
	RMSE	≤0,6028	≤0,5778	≤0,7123	≤0,2393	≤0,2622	≤0,3177

7.4 Conclusão

O aumento da temperatura da solução osmótica aumentou a WL e SG pelas amostras de gengibre. A condição USOD apresentou maior intensificação de transferência de massa quando comparado as demais condições de processamento (AGOD e OD). Entretanto a condição AGOD foi superior a OD, mostrando-se como alternativa viável para intensificação convencional. Os modelos de Peleg, Weibull e Z & L apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, porém o modelo Weibull apresentou maiores $R^2 \geq 0,9948$ e menores $RMSE \leq 0,1158$. Desse modo, a desidratação osmótica de gengibre em solução saturada de maltitol assistida por ultrassom e a agitada mecanicamente puderam ser consideradas como alternativas de processos intensificados de transferência de massa e com tempo de processamento reduzido.

7.5 Referências bibliográficas

- AHMAD-QASEM, M. H. et al. Kinetic and compositional study of phenolic extraction from olive leaves (*var. Serrana*) by using power ultrasound. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 17, p. 120–129, 2013.
- AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 34, p. 29–43, 2016.
- AMAMI, E.; VOROBIEV, E.; KECHAOU, N. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple tissue pre-treated by pulsed electric field. **LWT**, v. 39, n. 9, p. 1014–1021, 2006.
- AN, K. et al. Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles. **Food Science & Nutrition**, v. 7, n. 8, p. 2537–2545, 2019.
- BHARGAVA, N. et al. Advances in application of ultrasound in food processing: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 70, p. 105293, 2021.
- BIALIK, M. et al. The Influence of Osmotic Dehydration Conditions on Drying Kinetics and Total Carotenoid Content of Kiwiberry (*Actinidia Arguta*). **International Journal of Food Engineering**, v. 16, n. 1–2, 2020.
- CÁRCEL, J. A. et al. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p. 200 – 207, 2012.
- CHEN, Y. et al. Novel ultrasonic-assisted vacuum drying technique for dehydrating garlic slices and predicting the quality properties by low field nuclear magnetic resonance. **Food Chemistry**, v. 306, p. 125625, 2020.

CIURZYŃSKA, A. et al. Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. **Trends in Food Science & Technology**, v. 50, p. 186–192, 2016.

CUNHA et al. Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, n. 3, p. 253–262, 2001.

DASH, K. K.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; KAMAT, S. High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices. **Journal of Food Engineering**, v. 247, p. 19–29, 2019.

GALANAKIS, C. M. Functionality of food components and emerging technologies. **Foods** 2021, v. 10, n. 1, p. 128, 2021

GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. In: POVEY, M. J. W.; MASON, T. J. (Eds.). **Ultrasound in Food Processing**. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, 1999. p. 127–143.

GANJLOO, A. et al. Kinetics Modeling of Mass Transfer Using Peleg's Equation During Osmotic Dehydration of Seedless Guava (*Psidium guajava* L.): Effect of Process Parameters. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 6, p. 2151–2159, 2012.

JIANG, J. et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries. **LWT**, v. 145, p. 111300, 2021.

KOWALSKA, H. et al. The impact of using polyols as osmotic agents on mass exchange during osmotic dehydration and their content in osmodehydrated and dried apples. **Drying Technology**, v. 38, n. 12, p. 1620–1631, 2020.

KROEHNKE, J. et al. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) – The influence of ultrasound on process kinetics and product quality. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 71, p. 105377, 2021.

LEWICKI, P. P.; LENART, A. Osmotic dehydration of fruits and vegetables. In: **Handbook of industrial drying**. CRC press, 2020. p. 691-713.

LUSTIG, R. H.; SCHMIDT, L. A.; BRINDIS, C. D. The toxic truth about sugar. **Nature**, v. 482, n. 7383, p. 27–29, 2012.

MALDONADO, M.; GONZÁLEZ PACHECO, J. Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries. **Heliyon**, v. 8, n. 1, p. e08788, 2022.

MARTINS, M. J. N. et al. Transport properties of saturated sucrose and maltitol solutions as affected by temperature. **Journal of Molecular Liquids**, v. 336, p. 116254, 2021.

- MENDONÇA, K. et al. Mass transfer kinetics of the osmotic dehydration of yacon slices with polyols. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 1, p. e12983, 2016.
- MERCALI, G. D. et al. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). **LWT**, v. 44, n. 1, p. 82–91, 2011.
- MITCHELL, H. Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology. **Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology**, p. 1–413, 2007.
- OSAE, R. et al. Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. **Journal of Food Biochemistry**, v. 43, n. 5, 2019.
- PALACIOS ROMERO, I. et al. Optimization of the osmotic dehydration process of plums (*Prunus Salicina Lindl.*) in solutions enriched with inulin, using response surface methodology. **LWT**, v. 157, p. 113092, 2022.
- PELEG, M. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988.
- PRITHANI, R.; DASH, K. K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 64, p. 102407, 2020.
- RAHAMAN, A. et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 58, p. 104643, 2019.
- SHUKLA, A.; GOUD, V. V.; DAS, C. Antioxidant potential and nutritional compositions of selected ginger varieties found in Northeast India. **Industrial Crops and Products**, v. 128, p. 167–176, 2019.
- SRINIVASAN, K. Ginger rhizomes (*Zingiber officinale*): A spice with multiple health beneficial potentials. **PharmaNutrition**, v. 5, n. 1, p. 18-28, 2017.
- SULISTYAWATI, I. et al. Modelling the kinetics of osmotic dehydration of mango: Optimizing process conditions and pre-treatment for health aspects. **Journal of Food Engineering**, v. 280, p. 109985, 2020.
- TELIS, V. R. N.; MURARI, R. C. B. D. L.; YAMASHITA, F. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 2, p. 253–259, 2004.
- WHO. **Monographs on selected medicinal plants**. v. 1. Geneva, p. 277-287, 1999.

WOJDYŁO, A. et al. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 3, p. 829–841, 2014.

ZUGARRAMURDI; LUPÍN. A model to explain observed behavior on fish salting. **Journal of Food Science**, v. 45, n. 5, p. 1305–1311, 1980.

ZÚÑIGA, R. N.; PEDRESCHI, F. Study of the Pseudo-equilibrium During Osmotic Dehydration of Apples and Its Effect on the Estimation of Water and Sucrose Effective Diffusivity Coefficients. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 7, p. 2717–2727, 2012.

8. CONCLUSÃO GERAL

As técnicas de desidratação de frutas e vegetais como desidratação osmótica, secagem convencional e osmo-secagem vem sendo aprimoradas com a aplicação do ultrassom de alta intensidade. O ultrassom é uma tecnologia emergente, verde e não térmica que proporciona alterações desejáveis ao produto e ao processo, tais como: intensificação da transferência de massa, retenção da cor e compostos bioativos, melhora na textura e percepção sensorial. Devido a variabilidade das matrizes das frutas e vegetais e condições experimentais é bastante promissor a revisão e o desenvolvimento de trabalhos com aplicação de ultrassom em técnicas de desidratação.

Começando pelas propriedades das soluções osmóticas, é observado que elas têm um papel importante na intensidade dos campos acústicos produzido – razão pela qual foram estudadas suas propriedades em diferentes condições. Em geral, a densidade das soluções aumenta com o aumento da concentração e com a redução da temperatura, sendo obtida a maior densidade para soluções de frutose. O calor específico e a condutividade térmica apresentaram comportamento inverso da densidade, sendo obtido o maior calor específico na solução de frutose e a maior condutividade térmica na solução de sacarose. Ao analisar as propriedades de transporte (solubilidade, densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica) de soluções saturadas de sacarose e maltitol, foi apresentado um ponto de interseção entre as soluções, na qual ocorre o cruzamento dos dados das soluções. Maiores valores de solubilidade, densidade, viscosidade e difusão térmica foram obtidos para a solução saturada de sacarose, nas temperaturas inferiores antes do ponto de intersecção (295 a 340°C). Maiores valores de calor específico e condutividade térmica foram obtidos para a solução saturada de maltitol, nas temperaturas inferiores antes do ponto de intersecção. A viscosidade da solução saturada de sacarose diminuiu com o aumento da temperatura, comportamento contrário foi obtido para a solução saturada de maltitol. Tais comportamentos são atribuídos à simultânea mudança da solubilidade e concentração para manter a solução saturada em temperaturas mais elevadas.

Na desidratação osmótica de gengibre com solução saturada de maltitol, o aumento da temperatura intensificou a perda de água e o ganho de sólidos. Entre as três condições de processamento testadas, a aplicação de ultrassom de alta intensidade intensificou maior perda de água e ganho de sólidos seguido da condição com agitação mecânica e, por último, da desidratação convencional.

9. *SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS*

- Avaliar as alterações na microestrutura, parâmetros de qualidade e retenção de compostos bioativos do gengibre produzidos pela aplicação do ultrassom;
- Avaliar a influência do sentido de corte das amostras de gengibre nos parâmetros de qualidade do produto final e do processo de desidratação empregando o ultrassom;
- Realizar ensaios de osmo-secagem a partir das melhores condições de processamento da desidratação osmótica de gengibre com solução saturada de maltitol.
- Determinar e analisar a influência do ultrassom na estabilidade e retenção dos compostos específicos 6-gingerol e 6-shogaol no gengibre após processos de desidratação osmótica, secagem e/ou osmo-secagem;
- Avaliar o efeito de diferentes soluções osmóticas, convencionais e não-convencionais, no campo acústico produzido pelo ultrassom e na cinética de processos de desidratação;