

Gisandro Reis de Carvalho

Influência da aplicação de ultrassom em desidratação osmótica de carne bovina

São José do Rio Preto
2014

Gisandro Reis de Carvalho

Influência da aplicação de ultrassom em desidratação osmótica de carne bovina

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração – Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto

Banca Examinadora

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

Prof. Dr. Marinonio Lopes Cornelio
UNESP – São José do Rio Preto

Prof. Dr. Marco Antônio Trindade
USP – Pirassununga

São José do Rio Preto
2014

Carvalho, Gisandro Reis de.

Influência da aplicação de ultrassom em desidratação osmótica de carne bovina / Gisandro Reis de Carvalho. -- São José do Rio Preto, 2014

70 f. : il., tabs.

Orientador: Javier Telis-Romero

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Tecnologia de alimentos. 2. Carne bovina – Conservação. 3. Carne bovina – Desidratação. 4. Alimentos - Desidratação. 5. Modelagem de processos. 6. Ultrassom. I. Telis-Romero, Javier. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU – 664.91

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do IBILCE
UNESP - Câmpus de São José do Rio Preto

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Gilvan e Eloiza, que, mesmo apesar de todas as dificuldades, nunca mediram esforços e sempre me apoiaram em meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que vem acontecendo em minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Javier Telis Romero, que, desde a iniciação científica, sempre acreditou em mim, mesmo quando nem eu mesmo acreditava, que sempre me apoiou e me ajudou, que sempre esteve presente quando me faltou conhecimento e sabedoria.

Aos meus pais, Gilvan e Eloiza, que sempre batalharam muito para que eu conseguisse o que eles nunca tiveram oportunidade de ter, à minha irmã Giane que sempre me apoiou, independente do que acontecesse.

À toda minha família, que também sempre esteve presente me amparando. Aos meus amigos, em especial o André, que mesmo longe soube, na amizade, ajudar nos momentos de dificuldades. Aos meus amigos Guilherme e Rodolfo, agradeço pelo convívio, troca de experiências e ótimos momentos juntos durante essa fase do mestrado.

Aos colegas de laboratório, que sempre que podem me ajudam, especialmente o Harvey e o Tiago, grandes amigos e parceiros de trabalho. Aos técnicos, funcionários e professores do departamento que sempre dão suporte quando necessário.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento proporcionado através do processo número 2012/13487-2, que foi muito importante para o desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp) e ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos.

*"It is better to decide and make a
mistake, than not to decide. There
is always time to turn back"*

Nando Parrado

RESUMO

A desidratação osmótica é um processo empregado em produtos cárneos, que permite a redução da quantidade de água, tornando-os mais estáveis. A combinação da desidratação osmótica com outras tecnologias resulta em maior eficiência do processo. Atualmente, devido a seu amplo campo de ação, a tecnologia de ultrassom vem sendo empregada na indústria de alimentos, onde uma de suas grandes vantagens é a melhora na cinética de processos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da aplicação de ultrassom no processo de desidratação osmótica de carne bovina. Inicialmente, foi feita uma caracterização química do miolo da paleta bovina. Também foram determinadas experimentalmente, em função da concentração e temperatura, as propriedades termo-físicas: densidade, viscosidade dinâmica, calor específico e condutividade térmica de soluções de cloreto de sódio. A cinética de desidratação foi realizada conforme estabelecido por um planejamento experimental central composto envolvendo as variáveis: potência ultrassônica e concentração de cloreto de sódio. Modelos empíricos e semi-empíricos foram empregados para a modelagem e simulação das propriedades termo-físicas de soluções de cloreto de sódio, bem como para a cinética de desidratação osmótica. Em complementação à modelagem do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom, foi aplicada a metodologia de regressão passo a passo para a construção de um modelo capaz de prever o conteúdo de umidade em função do tempo, concentração de cloreto de sódio e potência de ultrassom, dentro da faixa dos valores experimentais. Para as propriedades termo-físicas, foram obtidos valores semelhantes aos reportados na literatura. A densidade variou de 1005,2 a 1178,5 kg·m⁻³, já a viscosidade apresentou valores de 0,536 a 2,198 mPa·s, sendo estas duas propriedades diretamente proporcionais à concentração e inversamente proporcionais à temperatura. O calor específico variou de 4,011 a 3,312 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹, enquanto que a condutividade térmica ficou entre 0,490 a 0,614 W·m⁻¹·°C⁻¹, sendo que foram inversamente proporcionais a concentração e somente a condutividade apresentou aumento em seus valores com o aumento da temperatura, enquanto que o calor específico foi praticamente constante em relação a esta variável. O ultrassom apresentou influência na desidratação osmótica de carne. Para a mesma concentração, o aumento da potência ultrassônica aplicada resultou em uma redução maior na umidade, 42,26 % de redução com 200 W e 46,41 % com 300 W, em uma concentração de 22,5 % de NaCl na solução. Todos os modelos ajustados, tanto para as propriedades termo-físicas, quanto para a desidratação osmótica, apresentaram ajustes com MRE < 10 %.

Palavras-chave: Carne bovina, desidratação osmótica, método passo a passo, modelagem, ultrassom.

ABSTRACT

Brining is an employed process in meat products that allows reducing the amount of water, making them more stable. The combination of brining with others technologies results in greater process efficiency. Nowadays, due to its wide field of action, ultrasound technology has been applied in food industry, where one of its great advantages is the improved process kinetic. Therefore, the present project aims to study the influence of ultrasound application in the osmotic dehydration process. Initially, meat was chemically characterized. The thermo-physical properties (density, dynamic viscosity, specific heat and thermal conductivity) of salt solutions were determined experimentally as a function of concentration and temperature. The kinetic of dehydration was determined by an experimental central composite design involving the variables ultrasonic power and sodium chloride concentration. Empirical and semi-empirical models were employed to the physical and thermal properties of sodium chloride solutions modeling and simulation, as well as the experimental dehydration kinetics, obtaining acceptable statistical fitting results. In addition to the osmotic dehydration assisted with ultrasound modeling was applied the stepwise regression method to construct a model that allows evaluate the moisture content as a function of time, salt concentration and ultrasound power within an experimental data range. Thermo-physical properties were similar to those reported in the literature. The density ranged from 1005,2 to 1178,5 kg·m⁻³, while the viscosity showed values from 0.536 to 2.198 mPa·s, these properties were directly proportional to concentration and inversely to temperature. The specific heat varied from 3.312 to 4.011 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹, while the thermal conductivity showed values from 0.490 from 0.614 W·m⁻¹·°C⁻¹, these two properties were inversely proportional to concentration and only the conductivity showed increase in their values with the temperature increase, while the specific heat was nearly constant with respect to this variable. The ultrasound application showed influence in the osmotic dehydration. In the same concentration, the ultrasonic power increase resulted in a greater moisture content reduction, 42.26 % with 200 W and 46.41 % with 300 W, in a NaCl solution with 22.5 % of salt. All adjusted models, both the thermo-physical properties as for osmotic dehydration showed MRE < 10 %.

Keywords: Meat, Osmotic dehydration, stepwise regression, modeling, ultrasound.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura da carne.....	3
Figura 2.2. Fenômeno de transporte de massa durante a desidratação osmótica.....	6
Figura 2.3. Representação da frequência de uma onda.....	9
Figura 2.4. (a) Descrição de uma fase dentro de um ciclo de oscilações, medido em graus. (b) Comparação de duas ondas com a mesma amplitude e frequência, mas em diferentes fases.....	10
Figura 2.5. O espectro do som.....	14
Figura 2.6. Transdutor operado por meio de fluidos.....	16
Figura 2.7. Princípio de aplicação de um transdutor magnetoestrutivo.....	16
Figura 2.8. Efeito piezoelétrico.....	18
Figura 2.9. Transdutor piezoelétrico tipo sanduíche.....	18
Figura 2.10. Secção de um banho ultrassônico. Detalhe da formação da onda estacionária principal.....	20
Figura 2.11. Sistema de sonda para aplicação de ultrassom de potência.....	21
Figura 2.12. Diferentes tipos de sondas acústicas e seus fatores de amplificação.....	23
Figura 2.13. Estrutura de um transdutor de prato escalonado.....	23
Figura 3.1. Miolo da paleta utilizado nos experimentos de desidratação osmótica.....	24
Figura 3.2. Miolo da paleta cortado em cubos.....	25
Figura 3.3. Amostras acondicionadas em sacos plásticos herméticos.....	25
Figura 3.4. Processador ultrassônico modelo UP 400S.....	26
Figura 3.5. Sonda de titânio modelo H22L2D.....	26
Figura 3.6. Ilustração da montagem experimental para a determinação da condutividade térmica.....	30
Figura 3.7. Estabilização da temperatura antes da desidratação osmótica (a) e desidratação osmótica em curso (b).....	32
Figura 4.1. Dados experimentais (○) e calculados (□) da densidade das soluções de NaCl.....	38
Figura 4.2. Dados experimentais (○) e calculados (□) do calor específico das soluções de NaCl.....	39
Figura 4.3. Dados experimentais (○) e calculados (□) da viscosidade dinâmica das soluções de NaCl.....	39
Figura 4.4. Dados experimentais (○) e calculados (□) de condutividade térmica das soluções de NaCl.....	40
Figura 4.5. Análise de resíduos da densidade das soluções de NaCl.....	40

Figura 4.6. Análise de resíduos do calor específico das soluções de NaCl.....	40
Figura 4.7. Análise de resíduos da viscosidade dinâmica das soluções de NaCl.....	41
Figura 4.8. Análise de resíduos da condutividade térmica das soluções de NaCl.....	41
Figura 4.9. Valores experimentais (●) e calculados (□) do numero de Prandtl através dos dados experimentais de ρ , μ e k e seus respectivos modelos ajustados.....	42
Figura 4.10. Análise de residuais do numero de Prandtl.....	42
Figura 4.11. Dados experimentais dos ensaios (1 - x0,075P200 (●), 2 - x0,225P200 (◀), 3 - x0,075P300 (*), 4 - x0,225P300 (▶), 5 - x0,15P180 (◊), 6 - x0,15P320 (⊗), 7 - x0,044P250 (+), 8 - x0,256P250 (□), 9 - x0,15P250 (Δ), 10 - x0,15P250 (○)) e calculados (····) empregando o modelo de Peleg.....	44
Figura 4.12. Valores experimentais e calculados com o modelo de Peleg para cada ensaio experimental (E) de desidratação osmótica assistida com ultrassom.....	46
Figura 4.13. Análise dos residuais do modelo desenvolvido para a simulação do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom pelo método passo a passo.....	48
Figura 4.14. Valores experimentais (●) e calculados (□) do conteúdo de umidade através do método passo a passo.....	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Descrição das análises químicas para o miolo da paleta bovina.....	27
Tabela 3.2. Desenho experimental central composto para o processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom.....	31
Tabela 4.1. Composição química do miolo de paleta bovina.....	34
Tabela 4.2. Densidade (ρ , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), calor específico (C_p , $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$), viscosidade dinâmica (μ , $\text{mPa}\cdot\text{s}$) e condutividade térmica (k , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) das soluções de cloreto de sódio a diferentes temperaturas*.....	35
Tabela 4.3. Análise de variância das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio*.....	37
Tabela 4.4. Resultados dos parâmetros dos modelos e validação estatística das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio.....	38
Tabela 4.5. Resultados do conteúdo de umidade do miolo de paleta bovina submetido a desidratação osmótica assistida com ultrassom*.....	43
Tabela 4.6. Parâmetros de ajuste do modelo de Peleg.....	45
Tabela 4.7. Resultados da modelagem do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom pelo método “stepwise repression” ou passo a passo.....	47

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Carne bovina.....	3
2.2. Composição do Músculo.....	4
2.3. Desidratação osmótica.....	5
2.4. Desidratação osmótica assistida com ultrassom.....	7
2.5. Ultrassom.....	7
2.5.1. Generalidades.....	7
2.5.2. Parâmetros ultrassônicos.....	8
2.5.2.1. Frequência.....	8
2.5.2.2. Comprimento de onda.....	9
2.5.2.3. Velocidade.....	9
2.5.2.4. Fase.....	10
2.5.2.5. Intensidade.....	11
2.5.2.6. Densidade acústica.....	11
2.5.2.7. Potência.....	11
2.5.2.8. Impedância Acústica.....	12
2.5.2.9. Atenuação.....	13
2.5.3. Classificação do Ultrassom.....	13
2.5.4. Ultrassom de Potência: geração.....	14
2.5.4.1. Transdutores operados por meio de fluídos.....	15
2.5.4.2. Transdutores magnetoestrictivos.....	16
2.5.4.3. Transdutores piezoelétricos.....	17
2.5.5. Equipamentos de ultrassom de potência.....	19
2.5.5.1. Banhos Ultrassônicos.....	19
2.5.5.2. Sistemas de Sonda.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1. Matéria prima e preparação das amostras.....	24
3.2. Descrição do equipamento de ultrassom.....	26
3.3. Caracterização química do miolo da paleta bovina.....	26
3.4. Determinação das propriedades termo-físicas das soluções de cloreto de sódio.....	27
3.4.1. Densidade.....	27
3.4.2. Calor específico.....	27

3.4.3. Viscosidade dinâmica.....	28
3.4.4. Condutividade térmica.....	28
3.4.5. Análise adimensional.....	30
3.5. Ensaios de desidratação osmótica assistida com ultrassom.....	30
3.6. Modelagem matemática e análise estatística dos diferentes estudos realizados.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1. Análise química.....	34
4.2. Resultados experimentais das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio.....	34
4.2.1. Modelagem matemática e análise estatística.....	36
4.2.2. Análise adimensional.....	41
4.3. Ensaios de desidratação osmótica assistida com ultrassom.....	42
4.3.1. Modelagem matemática do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom.....	44
5. CONCLUSÕES.....	49
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

A carne bovina é uma das matérias-primas mais importantes, tanto em aspectos nutricionais quanto econômicos. A cadeia de produção e consumo da carne e de seus subprodutos e derivados tem uma participação expressiva na economia de muitos países (ABIEC, 2013).

Devido à grande quantidade de nutrientes, tais como: proteína, lipídios, vitaminas e minerais (HUFF-LONERGAN, 2010) a carne é muito susceptível à proliferação de microrganismos deterioradores e patógenos. Alguns fatores ambientais, como presença de oxigênio, temperatura, luz, umidade, assim como as próprias enzimas presentes, podem causar alteração de sabor, cor e odor, reduzindo a qualidade do produto. É por esta razão que a indústria de carnes está sempre na procura de novas tecnologias ou métodos para aumentar a vida de prateleira, além de agregar valor aos produtos derivados de suas cadeias de processos. Os métodos tradicionais nesse aspecto são o congelamento, cozimento, secagem e desidratação osmótica (TORNBERG, 2013).

A desidratação osmótica é uma forma de se reduzir a água disponível, tanto para a ação de microrganismos, quanto de enzimas presentes na carne. Geralmente, é utilizada como uma etapa nos processos de cura e salga, e consiste na retirada de água da por meio da imersão desta em uma solução hipertônica de sal e, em alguns casos, açúcar. Durante a desidratação osmótica, predomina a transferência de água do produto para a solução e de soluto no sentido oposto (SIMAL et al., 1998).

Em relação ao fenômeno de transferência de água, o conhecimento de propriedades térmicas e físicas, em diferentes condições de temperatura e concentração de sal, são muito importantes para permitir o controle adequado de um processo. Além disso, essas propriedades são de interesse na área da modelagem de operações unitárias e desenho de equipamentos industriais. O conhecimento preciso e o desenvolvimento de modelos para estimar estas propriedades como uma função da concentração e da temperatura desempenha um papel importante nos processos que envolvem a transferência de quantidade de movimento, de calor ou de massa (FIGURA; TEIXEIRA, 2007). Muitos desses modelos envolvem o número de Prandtl (P_r) para correlacionar a difusividade mássica e a difusividade térmica, pela relação entre a viscosidade, o calor específico e condutividade térmica. Quando $P_r < 1$, indica que a difusão térmica ocorre a uma velocidade maior do que a difusão mássica e, por conseguinte, a condução de calor é mais eficiente do que por convecção (MILLS, 2000).

Atualmente, as diferentes indústrias de alimentos pesquisam o uso de soluções hipertônicas com métodos combinados para aumentar a velocidade do transporte de massa

em um processo de desidratação osmótica. Alguns desses métodos combinados envolvem o ultrassom de potência (CÁRCEL et al., 2007), eletrodialise (FIDALEO et al., 2012), alta-pressão (VILLAMONTE et al., 2013), mostrando resultados importantes, tais como a redução do tempo de processamento e uma maior qualidade do produto. Não obstante, todos estes processos devem ser adequadamente projetados e controlados.

Com base nos anteriores fatos, o presente projeto de pesquisa teve como objetivo principal estudar a influência da aplicação de ultrassom de potência durante o processo de desidratação osmótica de carne bovina.

Para o desenvolvimento do objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- ▲ Caracterizar quimicamente o miolo da paleta bovina.
- ▲ Determinar experimentalmente as propriedades físicas e térmicas (densidade, calor específico, viscosidade cinemática e condutividade térmica) do meio osmótico, em função da concentração de cloreto de sódio e temperatura.
- ▲ Modelar e simular as propriedades físicas e térmicas do meio osmótico.
- ▲ Avaliar experimentalmente a perda de água no processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom para o miolo da paleta bovina.
- ▲ Modelar e simular o processo de perda de água na osmodesidratação assistida com ultrassom do miolo da paleta bovina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Carne bovina

A carne é um dos alimentos mais completos consumidos pelo homem. Nutricionalmente, é uma excelente fonte de proteínas, minerais essenciais e vitaminas do complexo B. Contém aminoácidos essenciais para o desenvolvimento do homem (PARDI, 2001) assim como também minerais, como ferro, que tem maior biodisponibilidade (PENSEL, 1998).

Além da grande importância nutricional, a carne apresenta um papel econômico muito importante. No Brasil, um dos maiores produtores e exportadores do mundo, as exportações de carne e derivados, só no primeiro semestre de 2013, ultrapassaram três bilhões de dólares (ABIEC, 2013).

Quimicamente, a carne é composta por fibras que formam o tecido muscular, é formada também pelos tecidos conjuntivo e adiposo e pelos ossos (Figura 2.1).



Figura 2.1. Estrutura da carne (MONTEBELLO; ARAUJO, 2006).

Em termos de alimentos, o tecido muscular é o mais importante, pois é o componente da carcaça denominado “carne”. Formada por proteínas, que também são responsáveis por atributos como cor, textura, suculência e ainda pelo sabor e aroma característicos de cada tipo de carne. Na bovina, assim como em outras carnes vermelhas e de aves, esse tecido é composto por células que formam fibras alongadas, tubulares, agrupadas em feixes definidos, ligados ou envolvidos por tecido conjuntivo. Os feixes musculares são os responsáveis pela contração e pelo relaxamento muscular. Essa característica é proporcionada por miofibrilas e outras substâncias contidas no líquido sarcoplasmático (MONTEBELLO; ARAUJO, 2006).

As principais proteínas musculares são a actina e a miosina (proteínas miofibrilares), representando de 65 a 75 %. O crescimento e o desenvolvimento do tecido muscular são atribuídos a fatores genéticos e ao desenvolvimento do animal. Os músculos maiores e mais profundos crescem mais rapidamente que músculos superficiais que são menores. O crescimento muscular é, ainda, influenciado pelo sexo, pela raça e pela utilização da musculatura durante a vida do animal (MONTEBELLO; ARAUJO, 2006).

2.2. Composição do Músculo

O componente em maior quantidade na carne é a água. No tecido vivo, o conteúdo médio é de 75 % do peso, podendo variar de 65 a 80 % após o abate. Dentro do músculo, é o componente primário do fluido extracelular e dentro da célula muscular é o componente primário do fluido citoplasmático. Ela é importante na termorregulação; como um meio para vários processos celulares; e para o transporte intracelular, entre as células, e entre o músculo e o sistema vascular (HUFF-LONERGAN, 2010).

O segundo componente mais presente na carne é a proteína. Em média, constitui 18,5 % do peso do músculo, podendo variar de 16 a 22 %. As proteínas desempenham diversas funções e representam o principal componente sólido do músculo. As proteínas musculares estão envolvidas na manutenção da estrutura e organização do músculo e das células musculares. Elas são importantes no processo de contração. Estas proteínas estão associadas principalmente à organelas contráteis, as miofibrilas, por isso são denominadas proteínas miofibrilares. Em geral, elas não são solúveis em baixas forças iônicas, encontradas no músculo esquelético (força iônica $\leq 0,15$), mas podem ser solubilizadas em altas forças iônicas ($\geq 0,3$). Esta classe de proteínas inclui as que estão diretamente envolvidas no movimento (contráteis) e as que regulam as interações entre as proteínas contráteis (reguladoras). Há também proteínas solúveis (proteínas sarcoplasmáticas), que incluem as envolvidas no processo de sinalização celular e enzimas importantes no metabolismo e na degradação de proteínas/remodelação celular. E como uma terceira classe presente na carne, estão as proteínas do tecido conjuntivo, que exercem a função de recobrimento de fibras e dos feixes musculares, sendo representadas principalmente pelo colágeno, elastina e reticulina (HUFF-LONERGAN, 2010).

O conteúdo lipídico do músculo pode variar devido a vários fatores, incluindo a idade do animal, dieta e o tipo de músculo. De acordo com Callow (1948), o conteúdo de lipídios varia inversamente à quantidade de água. Alguns lipídios são armazenados dentro da célula muscular, entretanto, no músculo, a camada de gordura é encontrada entre feixes musculares (agrupamentos de células musculares). Em média, o conteúdo de lipídios é em torno de 3 % do peso do músculo, mas essa quantidade pode variar de 1 a 13 %. No

músculo esquelético, o lipídio desempenha papéis de armazenamento de energia, estrutura da membrana e em vários outros processos no órgão, incluindo respostas imunes e vias de reconhecimento celular (HUFF-LONERGAN, 2010).

Os dois principais tipos de lipídios encontrados no músculo esquelético são os triglicerídeos e os fosfolipídios, sendo que o primeiro grupo constitui a maior proporção associada ao músculo. Os triglicerídeos ou triacilglicerídeos consistem de uma molécula de glicerol, onde os grupos hidroxilas estão esterificados com três ácidos graxos. Os fosfolipídios (Fosfoglicerídeos) são outro tipo de complexo lipídico encontrado no músculo. Nesta classe de lipídios, um dos grupos hidroxila do glicerol é esterificado a um grupo fosfato, enquanto os outros constituintes são ácidos graxos. Os ácidos graxos associados com os fosfolipídios são, normalmente, insaturados. Os fosfolipídios, no músculo esquelético, são comumente associados com membranas. O relativamente alto grau de insaturação dos ácidos graxos associados com os fosfolipídios é um fator de contribuição para a fluidez das membranas celulares (HUFF-LONERGAN, 2010).

Os carboidratos representam uma pequena porcentagem do tecido muscular, em torno de 1 % do peso total do músculo (podendo variar de 0,5 a 1,5 %). O carboidrato em maior quantidade é o glicogênio. Outros carboidratos, incluindo glicose, intermediários do metabolismo do glicogênio, e outros monos e dissacarídeos, glicosaminoglicanos também são encontrados no músculo e estão associados com o tecido conectivo (HUFF-LONERGAN, 2010).

Devido à sua riqueza de nutrientes, a carne disponibiliza um ambiente adequado para a proliferação de microrganismos deterioradores e patógenos comuns de origem alimentar (AYMERICH et al., 2008). Alguns fatores atuando de forma conjunta influenciam na vida de prateleira e na manutenção da qualidade da carne, especificamente a manutenção da temperatura, oxigênio (O₂) atmosférico, enzimas endógenas, umidade, luz e, o mais importante, microrganismos. Todos esses fatores atuando individualmente, ou em combinação, podem resultar em alterações prejudiciais na cor (FAUSTMAN; CASSENS, 1990), no odor, na textura e no sabor da carne. Embora a deterioração da carne possa ocorrer na ausência de microrganismos (por proteólise, lipólise e oxidação), o crescimento microbiológico é, com certeza, o fator mais importante em relação à manutenção da qualidade da carne (LAMBERT et al., 1991).

2.3. Desidratação osmótica

Novas técnicas de processamento de alimentos, assim como as convencionais, devem aumentar a qualidade nutricional, higiênica e sensorial dos produtos, melhorar as características de processamento de matérias primas e produtos semi-acabados, aumentar

a variedade de produtos, e levar em conta os aspectos econômicos e ambientais do processamento. Métodos tradicionais como congelamento, resfriamento, secagem, pasteurização e esterilização são majoritariamente empregadas para a preservação de alimentos. Entretanto há uma vasta literatura referente às perdas de qualidades sensoriais, de vitaminas, microelementos e aromas (TAYLOR, 2004).

Devido às necessidades citadas anteriormente, houve o crescente interesse principalmente na desidratação osmótica. De fato, desde antes dos anos 90, desenvolvimentos significantes têm aperfeiçoado este processo como uma opção viável à operação de secagem, seja como único processo ou combinado com outros para preservação de alimentos (TAYLOR, 2004).

A desidratação osmótica é um método de remoção parcial de água dos alimentos, através da imersão de um produto em soluções hipertônicas. O gradiente de potencial químico entre o produto e a solução osmótica gera dois fluxos principais (Figura 2.2). O primeiro se caracteriza pela saída de água do produto para a solução, concorrentemente com o segundo, que é a migração do soluto, da solução para o produto. Há ainda um terceiro fluxo, menos importante, que é a saída de componentes do produto para a solução (RAOULT-WACK, 1994; TONON et al., 2007).

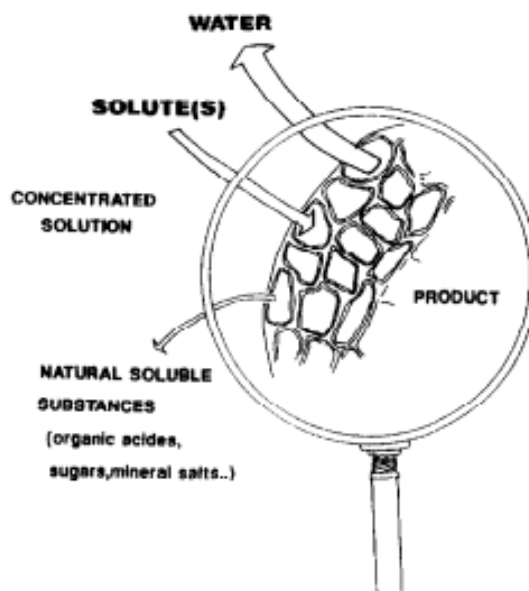


Figura 2.2. Fenômeno de transporte de massa durante a desidratação osmótica (TORREGGIANI, 1993).

A transferência de massa entre o produto e o meio desidratante é bastante afetada pela natureza do produto e pelas variáveis do processo, como o pré-tratamento, pressão,

temperatura, natureza e concentração do agente osmótico, agitação, tempo de processo, entre outros (RASTOGI et al., 2002; FALADE; IGBEKA, 2007).

A desidratação osmótica é amplamente aplicada como pré-tratamento para a secagem, no entanto, sua utilização tem se renovado e vem aumentando, principalmente como em pré-tratamento em técnicas combinadas, como a desidratação osmótica assistida por ultrassom (CÁRCEL et al., 2007; SIRÓ et al., 2009; CÁRCEL et al., 2012).

2.4. Desidratação osmótica assistida com ultrassom

O princípio da aplicação de ultrassom em sistemas líquidos baseia-se nos efeitos das ondas mecânicas que estão principalmente relacionadas com o fenômeno da cavitação. Quando a energia do ultrassom é aplicada no meio líquido, as ondas ultrassônicas irão causar uma série de rápidas contrações e expansões, semelhante a uma esponja quando é apertada e solta repetidamente (efeito de esponja). Bolhas são produzidas durante a cavitação e elas entram em colapso com diferentes intensidades (BRENNAN, 2006).

O processo de desidratação osmótica assistido por ultrassom é usado para melhorar o transporte de massa (tanto a remoção de água e ganho de soluto) durante a desidratação osmótica. Seu modo de atuação é nos canais microscópicos criados no interior dos capilares do material pela aplicação, influenciando de forma direta na remoção da umidade (DENG; ZHAO, 2007; GARCIA-NOGUERA et al., 2010). A aplicação de agitação mecânica não é necessária porque as ondas ultrassônicas se propagam por todo o meio líquido. O processo pode ser realizado sob condições de temperatura ambiente, porque temperaturas mais elevadas não influenciam na aplicação de ultrassom (SIMAL et al., 1998)

2.5. Ultrassom

2.5.1. Generalidades

O ultrassom é constituído por ondas com frequência superior ao limite da audição humana (20 kHz). Esta divisão de frequências é totalmente arbitrária e não possui nenhuma justificativa física. As leis físicas de geração e propagação do som são válidas para todo o espectro de frequências. O ultrassom está amplamente presente na natureza (CARLIN, 1972). A frequência máxima captada pela audição humana é inferior a de muitos animais, como os cachorros, por exemplo, que podem ouvir frequências superiores a 50 kHz ou os golinhos e morcegos que podem captar ondas próximas aos 100 kHz. Alguns destes animais baseiam a maior parte de sua comunicação na utilização do ultrassom (CÁRCEL, 2003; CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

A utilização do ultrassom pelo homem começou em 1880, quando o casal Curie descobriu o efeito piezoelétrico, que a base fundamental em que se apoia a tecnologia dos transdutores modernos. Porém, o primeiro transdutor de ultrassom foi o apito, desenvolvido por Francis Galton em 1883 ao estudar o limite da audição humana. A primeira aplicação comercial do ultrassom ocorreu em 1917 com o “rastreador de ecos” (eco-sounder), inventado e desenvolvido por Paul Langevin. Esse sistema deu lugar ao SONAR (*Sound Navigator and Ranging*) na detecção submarina, que foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, surgiu o microscópio de varredura ultrassônica e numerosas aplicações como análise não destrutiva na medicina, na verificação de soldas, na detecção de fissuras, entre outras (KUTTRUFF, 1991).

Entretanto, se o ultrassom é aplicado com uma potência suficientemente grande, é possível influenciar um determinado processo, produto ou reação química. Essa influência é dada, na maioria das vezes, pela cavitação. Este fenômeno foi identificado em 1895 nas hélices dos barcos. Se o movimento das mesmas fosse muito rápido, eram produzidas as então denominadas bolhas da cavitação, que, ao se romperem, causavam erosão nas hélices. A partir de 1945, houve maior conhecimento do fenômeno de cavitação e o desenvolvimento de novos equipamentos para aplicação de ultrassom com uma potência desejada (MASON; LORIMER, 2002).

2.5.2. Parâmetros ultrassônicos

Para entender melhor as distintas aplicações do ultrassom, convém conhecer quais são os principais parâmetros que o caracteriza. Em líquidos e gases, as oscilações das partículas se dão na mesma direção da onda, são as denominadas longitudinais. Porém, nos sólidos, também pode aparecer um *stress* tangencial, de modo que as partículas se movimentem perpendicularmente à direção da onda. Esse tipo de movimento recebe o nome de transversal. Além destes, ainda existem ondas que se propagam próximo à superfície dos corpos. São denominadas ondas de superfície ou de Rayleigh (FAHY, 2000). O ultrassom, assim como qualquer tipo de onda, se caracteriza por uma série de parâmetros como a frequência, a intensidade, a potência, etc.

2.5.2.1. Frequência

A frequência de onda é definida como o número de oscilações ou ciclos de onda que passam por um observador estacionário por segundo (Figura 2.3) e é determinada pela fonte da onda. O símbolo f é normalmente atribuído à frequência e sua unidade é o *hertz* (1

Hz = 1 ciclo por segundo). O inverso da frequência é o período (T , s), que é definido como tempo necessário para completar um ciclo (MARTIN, 2010).

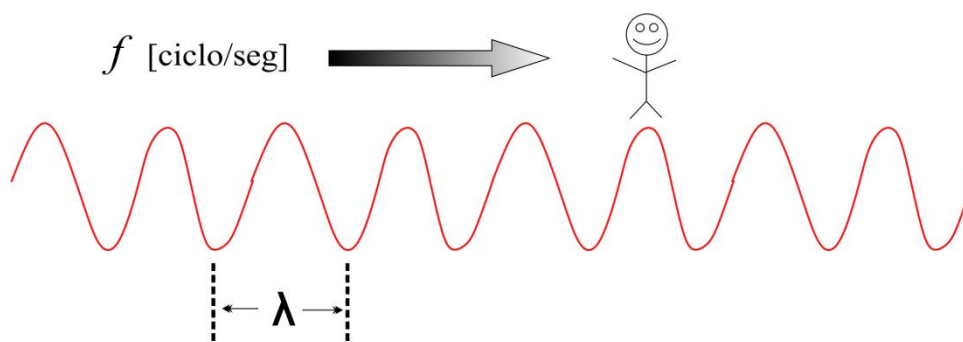


Figura 2.3. Representação da frequência de uma onda (MARTIN, 2010).

2.5.2.2. Comprimento de onda

O comprimento de onda (λ , m) é definido como a distância que separa dois pontos consecutivos que vibram em fase. É determinado a partir da velocidade (v) e da frequência (f) (Eq. 2.1).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

Uma onda, cujas extremidades estão à *lambda* metros de distância e passam através de um observador a uma taxa de f ciclos por segundo deve estar viajando a uma velocidade de $f \cdot \lambda$ metros por segundo. Isto é, a velocidade do som $v = f \cdot \lambda$. No entanto, é mais preciso fisicamente dizer que uma onda a partir de uma fonte de frequência f , viaja através de um meio no qual a velocidade do som é v e tem um comprimento de onda λ , onde $\lambda = v/f$. Por exemplo, uma onda sonora emitida de uma fonte com frequência de 30 kHz viaja, através da água, onde a velocidade de propagação é de, aproximadamente, $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, com um comprimento de onda de 50 mm, enquanto que a mesma onda viaja, através do ar, onde a velocidade de propagação é aproximadamente $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, com comprimento de onda de 10 mm (CARLIN, 1972; MARTIN, 2010).

2.5.2.3. Velocidade

A velocidade de propagação do som é uma constante para um determinado material, em determinadas condições, e depende exclusivamente de suas propriedades físicas. Esta propriedade faz com que a velocidade de propagação do som possa ser utilizada para caracterizar um material. Existem diferentes tipos de velocidade que convém diferenciar. As

mais importantes são a velocidade de fase e a velocidade de grupo. A velocidade de fase é a velocidade com que uma fase (onda de frequência única) se propaga através de um meio. A velocidade de grupo é a velocidade na qual se propagam ondas harmônicas, compostas de várias frequências simples, mas de amplitudes moduladas. A velocidade é representada pelo símbolo v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (FAHY, 2000).

2.5.2.4. Fase

Assim como uma onda passa através de um meio, as partículas são deslocadas para trás e para frente de suas posições de repouso e um ciclo periódico. O padrão de deslocamento das partículas em função do tempo pode ser descrito, muitas vezes, por uma onda senoidal (Figura 2.4). Este padrão de deslocamento é tal como seria vista a altura de um pedal de rotação da bicicleta quando visto por trás desta. Um ciclo completo da altura do pedal corresponde a uma rotação de 360° . A altura do pedal em qualquer ponto do ciclo está relacionada com o ângulo do pedal, quando visto de lado. Portanto, a fase do pedal é a sua posição dentro de um determinado ciclo de rotação e é medido em graus (MARTIN, 2010).

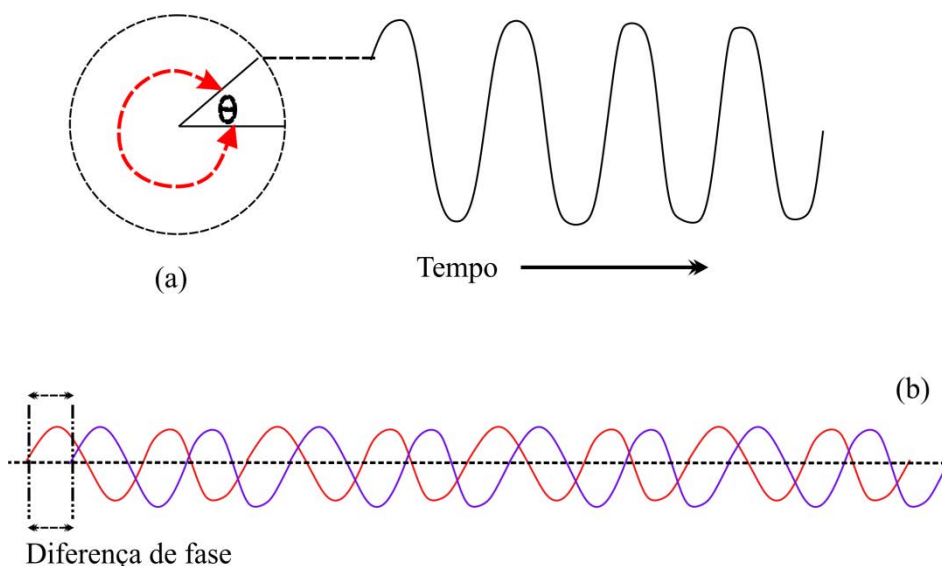


Figura 2.4. (a) Descrição de uma fase dentro de um ciclo de oscilações, medido em graus. (b) Comparação de duas ondas com a mesma amplitude e frequência, mas em diferentes fases (MARTIN, 2010).

Duas ondas de mesma frequência podem diferir com relação às suas fases e podem ser comparadas em função dessa diferença, medida em graus. A diferença de fase é um conceito importante quando as ondas são somadas ou convergentes (FAHY, 2000).

2.5.2.5. Intensidade

A intensidade de uma onda acústica é definida como a energia média transmitida através da unidade de área perpendicular à direção de propagação da onda. A intensidade acústica é proporcional ao quadrado da pressão acústica:

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho v} \quad (2.2)$$

Onde I é a intensidade acústica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); P_A é a pressão acústica (Pa); ρ é a densidade do meio de propagação ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e v é a velocidade de propagação da onda no meio ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (MASON; LORIMER, 2002).

Dado que a intensidade acústica pode ser afetada por muitos fatores, é comum utilizar uma intensidade de referência. Tem-se como intensidade de referência $I_0 = 10^{-12}$, calculado a partir da pressão acústica de referência, o limite da audição humana nas condições padrão do ar ($2,1\cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$) (CÁRCEL, 2003).

2.5.2.6. Densidade acústica

A densidade de energia acústica é uma forma de energia fundamental que pode dissipar-se na forma de calor. Representa o trabalho realizado ao deslocar as partículas de um meio que, por outro lado, está sujeito a forças contrárias ao deslocamento do próprio meio elástico. Para uma onda plana, a densidade de energia se pode expressar como:

$$E = I/v \quad (2.3)$$

onde E é a densidade de energia ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$). Como a energia expressa em Joule pode ser analogamente representada em Newton vezes metro ($\text{N}\cdot\text{m}$), as unidades da densidade de energia resultam em $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$, que são unidades de pressão. Portanto, a densidade de energia de uma onda corresponde ao nível de pressão acústica (BRUNEAU; POTEL, 2013).

2.5.2.7. Potência

A potência acústica é a energia total transmitida por uma fonte por unidade de tempo. Ela pode ser calculada a partir da Eq. 2.4:

$$W = IS \quad (2.4)$$

onde S representa a área superficial da fonte emissora (m^2) e W a potência acústica em watts (W). Uma forma de expressar a potência consiste em utilizar a notação de decibéis. O decibel acústico é definido como o logaritmo, em base decimal, do quociente entre a

intensidade (ou a potência) em um determinado meio e a intensidade (ou a potência) de referência (FAHY, 2000).

$$dB = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.5)$$

Ao utilizar como $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a potência sonora (PS) de qualquer outra fonte, expressa em decibéis, pode ser representada como:

$$PS = 10 \log \frac{I}{1 \cdot 10^{-12}} \quad (2.6)$$

Dado que sistemas de medida, como os microfones ou hidrofones, captam pressões acústicas ao invés de intensidades e sabendo a relação entre intensidade e pressão acústica, pode-se calcular a pressão acústica (P_A) em termos de decibéis, por meio da Eq. 2.7:

$$P_A = 10 \log \frac{P_d^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P_d}{P_0} \quad (2.7)$$

onde P_d é pressão acústica dinâmica ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) e P_0 é a pressão de referência ($2,1 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$) (FAHY, 2000).

2.5.2.8. Impedância Acústica

A impedância acústica (Z) de um meio é uma medida da resposta de suas partículas em termos de velocidade, para uma onda a uma determinada pressão. Também é referida como a relação entre a pressão acústica e a velocidade da partícula (v_p , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (Eq. 2.8). De maneira geral, Z é uma magnitude complexa que poder ser dividida em uma parte real, a componente resistiva, e outra imaginária, a componente reativa (MCCLEMENTS; GUNASEKARAN, 1997).

$$Z = \frac{P_A}{v_p} \quad (2.8)$$

A Eq. 2.8 é análoga à impedância elétrica ou resistência (R), que é a relação entre a tensão (V) aplicada a um componente elétrico (a força de condução elétrica ou pressão) para a corrente elétrica resultante (I) que passa através dele (a resposta), conforme a expressão da lei de Ohm: $R = V/I$. A impedância acústica de um meio é novamente determinada por sua densidade (ρ) e rigidez (k) (Eq. 2.9) (MARTIN, 2010).

$$Z = \sqrt{\rho k} \quad (2.9)$$

Combinando a Eq. 2.8 com a Eq. 2.9, pode ser demonstrado que:

$$Z = \rho v \quad (2.10)$$

As unidades de impedância acústica são $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, mas o termo Rayl, proveniente da lei de Rayleigh, é frequentemente utilizado para expressar esta grandeza (MARTIN, 2010).

Esta propriedade apresenta uma grande importância nas aplicações de ultrassom. Se a proporção refletida de uma onda incidente é muito elevada, os efeitos do ultrassom serão mais intensos na interface. Do contrário, se a proporção de onda transmitida é muito elevada, os efeitos do ultrassom poderão ser mais observados no interior do segundo meio (FAHY, 2000; CÁRCEL, 2003).

2.5.2.9. Atenuação

Durante a propagação de uma onda acústica através de um meio, a intensidade desta diminui gradativamente com o aumento da distância da fonte que a produz. A intensidade em uma determinada distância é dada pela equação

$$I = I_0 e^{(-\alpha d)} \quad (2.11)$$

onde d é a distância entre a fonte da onda e o ponto considerado e α é o chamado coeficiente de atenuação ou absorção. Esta atenuação pode ser resultado da conversão de parte da energia cinética gerada pela onda em calor.

Em aplicações com líquidos, as forças viscosas se opõem à vibração das partículas. Isto faz com que parte da energia acústica se transforme em calor, o que eleva a temperatura do meio. Para um determinado líquido, a certa temperatura, a relação entre o coeficiente de atenuação e o quadrado da frequência acústica aplicada ($\alpha \cdot f^2$) permanece constante. O aumento da frequência da onda supõe um aumento do coeficiente de atenuação e, portanto, que a intensidade acústica diminua mais rapidamente com o aumento da distância (MASON; LORIMER, 2002).

2.5.3. Classificação do Ultrassom

Os tipos de ondas sonoras são classificados em função de suas frequências (Figura 2.5). O termo infrassom refere-se às ondas de baixas frequências. Abaixo da faixa de frequência perceptível pelo ouvido humano. Essa classe de onda é utilizada por barcos e submarinos em seus equipamentos do tipo SONAR. A faixa perceptível à audição humana encontra-se entre 20 Hz a 20 kHz. O ultrassom é tipo de onda que possui uma frequência superior à percepção humana. Este espectro ultrassônico pode ser dividido em duas sub-faixas, a primeira, classificada como ultrassom de potência, onde o maior foco de estudos

está na faixa de 20 kHz a 1 MHz e, a segunda, chamada de ultrassom de diagnóstico, que supera a frequência de 1 MHz (FENG, BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 2010).

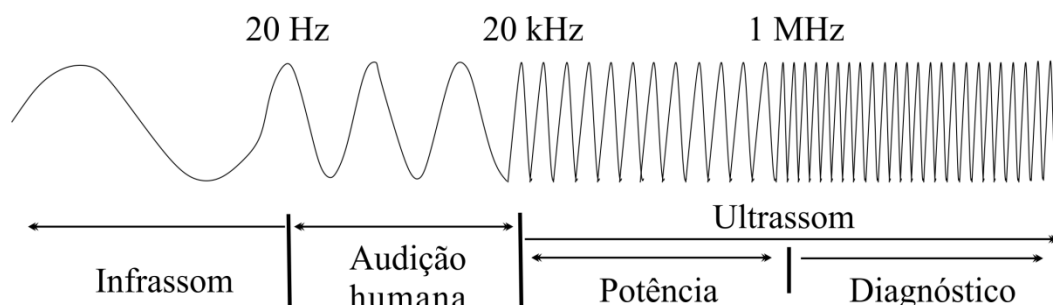


Figura 2.5. O espectro do som (FENG *et al.*, 2010).

Segundo Mason (2000), a pesquisa aplicando ultrassom pode ser dividida em três vertentes:

Sonoquímica: originada na química e física, que inclui aplicações tradicionais como catálise e síntese, onde, o fenômeno da cavitação, foco de estudo, é o principal responsável por estes processos. Indústrias como a de proteção ambiental (tanto biológicas como químicas), ciência dos materiais (novos materiais catalíticos, extração, cristalização, polimerização), eletroquímica (eletrossíntese e eletroanalítica) e biotecnológica (modificação de atividades enzimáticas e celular).

Ultrassom de potência: com sua origem na engenharia de processamento, que inclui limpeza de soldas e processamento de materiais a nível industrial.

Ultrassom de diagnóstico: para ensaios não destrutivos e digitalização médica, tem despertado grande interesse na pesquisa e na indústria.

Para a indústria de alimentos, o ultrassom pode apresentar grande vantagem, devido a sua classificação como energia benigna, quando comparado com técnicas como micro-ondas, radiação gama e pulsos elétricos, que requerem precauções no momento da aplicação.

2.5.4. Ultrassom de Potência: geração

De maneira geral, a produção de ultrassom consiste na conversão de qualquer outro tipo de energia em energia acústica. O modo de realizar este processo dependerá das necessidades de geração, principalmente da intensidade necessária e da faixa de frequência a cobrir (CARLIN, 1972). Qualquer sistema de geração de ultrassom conta com dois componentes essenciais, uma fonte de energia e um transdutor. A princípio, a energia fornecida pela fonte pode ser de qualquer tipo, elétrica, magnética ou mecânica. O

transdutor é encarregado de transformar esta energia em energia acústica, com características de frequência e intensidade necessárias (FAHY, 2000).

Os transdutores são dispositivos formados por um conjunto de elementos, onde, entre eles, o mais importante é o responsável pela produção do ultrassom. Os demais componentes da estrutura do transdutor são elementos mais ou menos passivos que se encarregam de melhorar a dissipação da energia acústica. Os principais pontos a considerar nos transdutores são a capacidade de potência, o rendimento na conversão da energia inicial em energia acústica, a amplitude e distribuição da vibração e a capacidade de direcionar a energia emitida (GALLEGO-JUÁREZ, 2002)

Os transdutores podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a maneira de transformar a energia em ondas ultrassônicas: os transdutores operados por meio de fluidos, os transdutores magnetoestrictivos e os transdutores piezoelétricos (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

2.5.4.1. Transdutores operados por meio de fluídos

Estes tipos de transdutores converte a energia cinética de um fluido em energia acústica. O exemplo mais comum é o apito. Seu funcionamento consiste em um fluxo de gás em uma cavidade ressonante através de um orifício. O sólido influencia no escoamento do gás e então é produzido um som na mesma frequência que a perturbação produzida no gás (MASON; LORIMER, 2002).

Também existem os chamados transdutores operados por meio de líquidos (Figura 2.6). Seu funcionamento consiste em bombear um fluido para uma câmara através de um orifício. A câmara dispõe de uma lâmina de aço delgada que começa vibrar pela ação da corrente de fluido. Esta vibração cria a onda acústica. Estes sistemas são muito utilizados em aplicações de homogeneização e de mistura. Além disso, a operação de mistura é favorecida pelo efeito Venturi que se produz pela expansão do líquido ao passar para a câmara pelo orifício (KUTTRUFF, 1991).

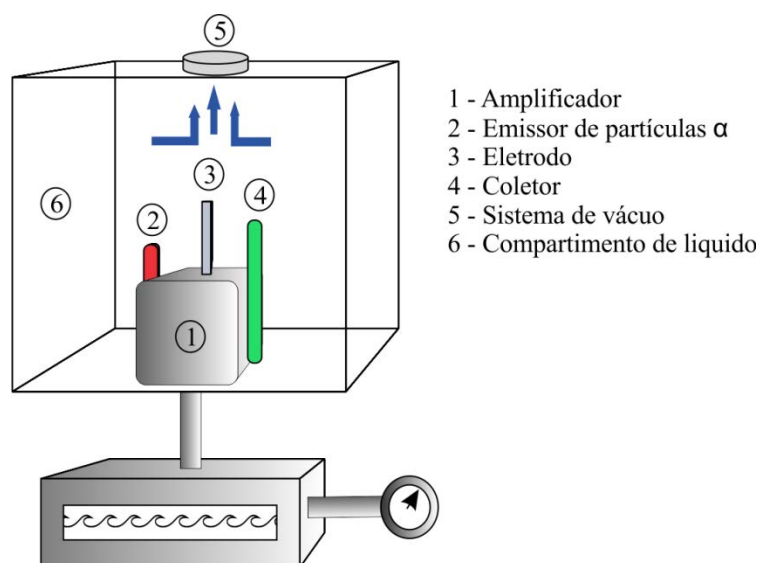


Figura 2.6. Transdutor operado por meio de fluidos (KUTTRUFF, 1991).

2.5.4.2. Transdutores magnetoestritivos

Estes foram os primeiros transdutores utilizados em escala industrial para a geração de ultrassom de alta intensidade. O funcionamento é baseado na propriedade de alguns materiais, como por exemplo, o níquel, de ter o tamanho reduzido, quando submetido a um campo magnético, e retornar ao seu tamanho original quando retirado do campo. Se o campo magnético é aplicado em uma série de pulsos curtos, o transdutor vibra com a mesma frequência de aplicação dos pulsos magnéticos (CARLIN, 1972).

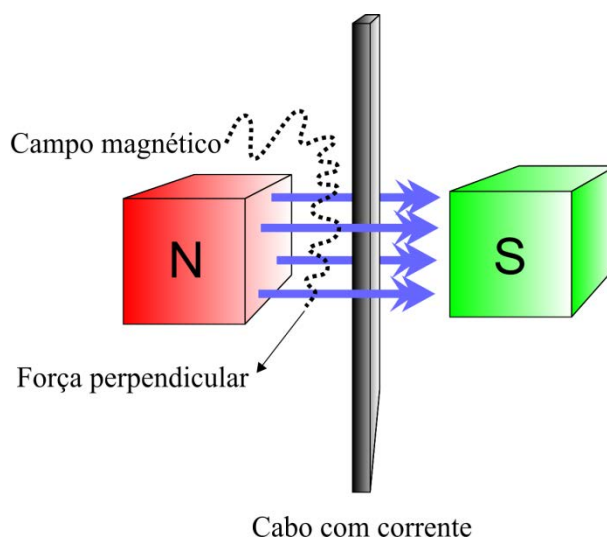


Figura 2.7. Princípio de aplicação de um transdutor magnetoestritivo (KUTTRUFF, 1991).

As principais vantagens destes tipos de transdutores são a robustez e a durabilidade. Além disso, proporcionam sinais muito mais potentes, o que os capacita para aplicações

pesadas e em temperaturas elevadas. Porém, apresentam duas desvantagens consideráveis. A primeira é que a frequência máxima gerada é de 100 kHz, já que os materiais não conseguem responder com velocidade maior ao efeito magnetoestritivo. A segunda é a eficiência que é menor que 60 %, o que resulta em grandes perdas na forma de calor (KUTTRUFF, 1991).

2.5.4.3. Transdutores piezoelétricos

Os equipamentos de ultrassom mais comumente empregados na produção e detecção utilizam propriedades piezoelétricas de certos materiais cristalinos como, por exemplo, o quartzo. Se uma secção fina deste cristal é cortada, de modo que a superfície maior seja normal ao eixo x da secção resultante, o material irá apresentar duas propriedades complementares (Figura 2.8):

O efeito direto: ocorre quando a pressão é aplicada através da maior superfície da secção, e então uma carga de mesma intensidade, com sinais opostos é produzida em cada face. A polaridade é invertida, sendo que a tensão é aplicada ao longo da superfície.

O efeito indireto: ocorre ao se aplicar cargas iguais, porém de sinais opostos em cada uma das faces do cristal, fazendo com que esse se expanda ou se contraia em função da polaridade.

Ao se aplicar uma corrente elétrica com mudanças de polaridade suficientemente rápidas é possível gerar uma vibração no cristal, produzindo então uma onda acústica. O funcionamento ótimo de um determinado cristal se obtém na frequência de ressonância, que depende das dimensões do mesmo (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

Além do quartzo, existem muitos outros materiais piezoelétricos empregados em equipamentos de ultrassom. Três dos mais comumente utilizados são o titanato de bário (BaTiO_3), o metaniobato de chumbo (PbNb_2O_6) e a mistura titanato-zirconato de chumbo (PZT's). Estes materiais são compostos ferroelétricos, isto é, são espontaneamente polarizados e suas polaridades são alteradas por deformação mecânica; Estes materiais não podem ser obtidos na forma de grandes cristais, mas sim, moídos com ligantes e sintetizados sob pressão e temperatura de 1000 °C até se obter um material cerâmico. Geralmente, dois compostos são combinados a fim de aumentar o movimento global. A mistura de diferentes materiais tem permitido o desenvolvimento de transdutores ultrassônicos de potência e frequência variável, podendo então atender diversas aplicações (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

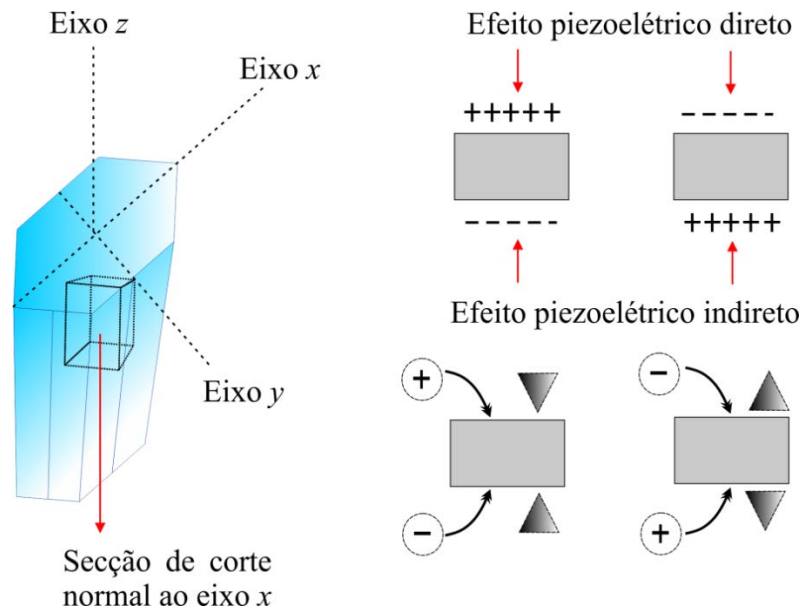


Figura 2.8. Efeito piezoelétrico (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

Os transdutores piezoelétricos baseados nesses tipos de combinação são chamados de “compósitos 1-3” ou “sanduíche” (Figura 2.9), que consistem de uma matriz de pilares piezoelétricos incorporada em um material flexível, fornecendo a forma de folha moldável, abrindo novos caminhos para o desenvolvimento. Pelo fato da face emissora ser uma combinação entre cerâmica e plástico, a transmissão acústica em sistemas aquosos é facilitada (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

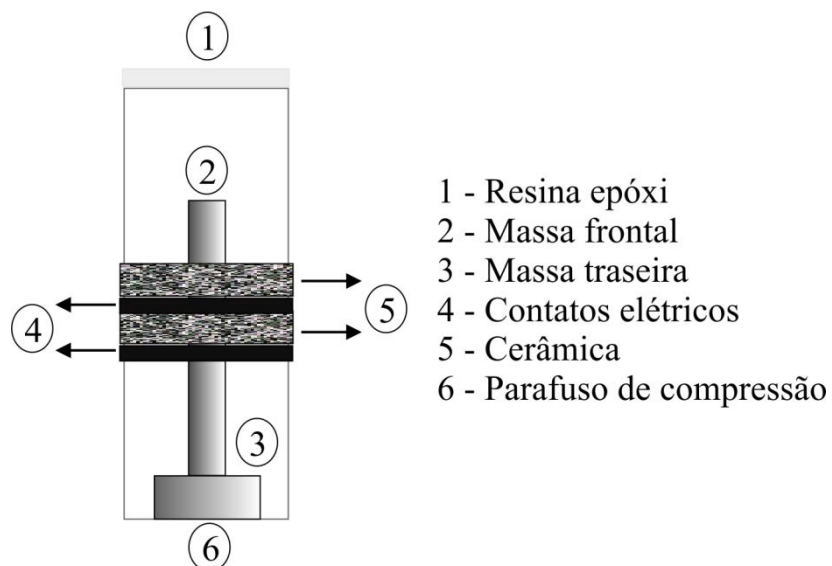


Figura 2.9. Transdutor piezoelétrico tipo sanduíche (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

2.5.5. Equipamentos de ultrassom de potência

A maioria dos sistemas utilizados para a aplicação de ultrassons de alta intensidade baseia-se em sistemas eletroacústicos, principalmente piezelétricos e, em menor escala, magnetoestrictivos. O equipamento necessário para qualquer destas duas aplicações é o mesmo, e se compõe de três partes essenciais. Um gerador para converter o sinal elétrico da rede à frequência requerida. Um transdutor que converta esta corrente de alta frequência em vibrações mecânicas. E por último, é necessário um sistema de aplicação que transporte a energia acústica gerada pelo transdutor ao meio que se deseja tratar. Este sistema de aplicação pode limitar-se a transmitir a energia acústica ou, também, a produzir alguma modificação como, por exemplo, amplificá-la (MASON; LORIMER, 2002; HEIKKOLA; LAITINEN, 2005).

2.5.5.1. Banhos Ultrassônicos

Provavelmente seja um dos sistemas de produção de ultrassom mais econômicos e acessíveis, e, por esta razão, seja a fonte de maior parte dos trabalhos de pesquisa publicados (MULET et al., 1999). De maneira geral, consistem num tanque de aço inox no qual se acoplam transdutores em sua base (Figura 2.10). Por sua vez, os transdutores vão conectados a um equipamento eletrônico capaz de fornecer energia elétrica nas condições necessárias (frequência e intensidade) para excitá-los. O número de transdutores pode variar, porém todos têm que vibrar na mesma fase, com isso, aumenta-se a quantidade de energia acústica produzida por unidade de superfície emitente. A potência gerada dependerá principalmente do número de transdutores e a frequência do tipo de transdutor (MASON, 2000).

Para começar a funcionar, os banhos ultrassônicos são preenchidos de um líquido. O tratamento será realizado no líquido ou em algum recipiente submerso no mesmo (banho-maria). Quando os transdutores vibram, a base do tanque converte-se em emissor das ondas acústicas. A base do tanque, além do meio, também transmite a vibração às paredes do banho, o que a converte em emissores de ondas. Devido à reflexão dos sinais, são geradas ondas estacionárias. A principal se localiza entre a base do banho e a interface líquido-ar. A diferença de impedâncias acústicas entre estes dois meios (qualquer líquido e um gás como o ar) é muito elevada, provocando a reflexão na interface de praticamente 100% das ondas acústicas. Portanto, a onda que parte da base do banho chega à interface líquido-ar, reflete-se e interage com a nova onda proveniente do transdutor criando assim o campo estacionário. Todos estes emissores de ondas e as sucessivas reflexões das mesmas nas interfaces provocam a criação de áreas de máxima e mínima intensidade

ultrassônica e, finalmente, um campo acústico bastante caótico (WELTI-CHANES et al., 2005; CAPOTE; DE CASTRO, 2007). Como se pode deduzir, a altura do líquido no banho pode influenciar muito no campo criado, o que torna conveniente trabalhar com o nível de líquido recomendado pelos fabricantes (MASON; LORIMER, 2002).

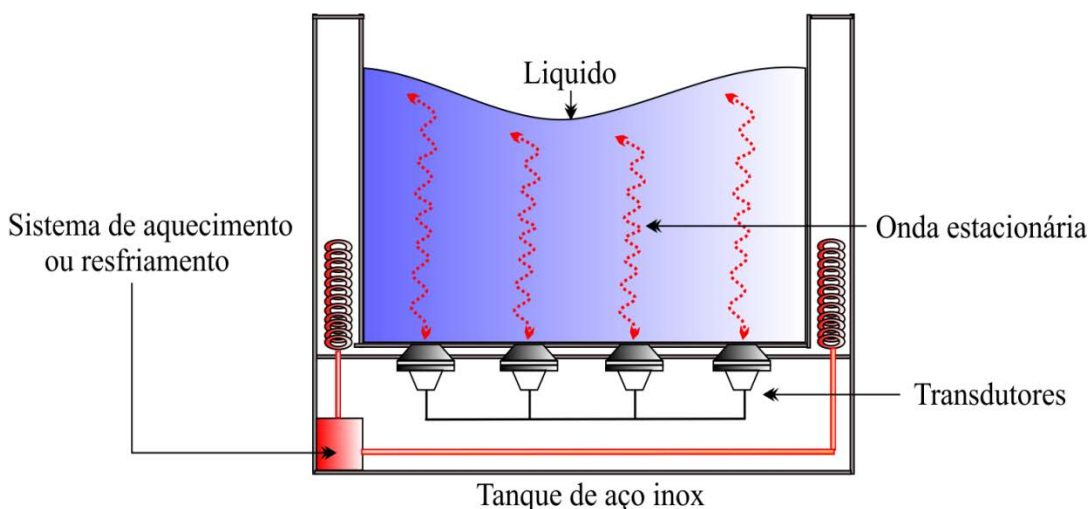


Figura 2.10. Secção de um banho ultrassônico. Detalhe da formação da onda estacionária principal (POVEY; MASON, 1998).

Para evitar, na medida do possível, a formação de campos estacionários, alguns banhos dispõem de sistemas que realizam uma varredura de frequências. Eles também podem apresentar algum sistema termostático de aquecimento ou resfriamento para regular a temperatura. Alguns banhos são equipados com reguladores da potência emitida e, inclusive, de dispositivos para aplicar ultrassom em forma de pulsos que minimizam o problema da criação de campos estacionários (POVEY; MASON, 1998).

Como principais vantagens destes equipamentos, pode-se dizer que são simples, relativamente econômicos e fáceis de encontrar no mercado. Entre as desvantagens convém destacar a dificuldade para medir a intensidade ultrassônica real produzida. Outro inconveniente destes equipamentos é a pouca potência que, ao serem comparados com outros sistemas, são capazes de transmitir ao meio. A isto se soma que a intensidade ultrassônica varia dentro do banho com relação à posição das amostras resultando em um parâmetro muito importante de ser controlado. Por último, destacar a dificuldade do controle de temperatura quando se deseja trabalhar com uma faixa de erro mínimo (POVEY; MASON, 1998; CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

2.5.5.2. Sistemas de Sonda

Estes sistemas baseiam-se na transferência de energia ultrassônica ao meio, onde esta é produzida por um transdutor e transmitida através de uma sonda metálica (Figura 2.11). Utilizam-se para aplicações tanto em líquidos como em gases. O sistema constitui-se de um gerador que produz um sinal elétrico na frequência e potência desejada, um transdutor piezelétrico que transforma a energia elétrica em acústica e, uma sonda que transmite esta energia acústica ao meio a ser tratado. A intensidade da onda emitida, isto é, a amplitude de vibração da ponta da sonda, pode ser controlada alterando a potência aplicada pelo gerador. Praticamente todos os equipamentos dispõem de um controle de potência deste tipo, possibilitando a aplicação do sinal em forma de pulsos (PINJARI; PANDIT, 2010).

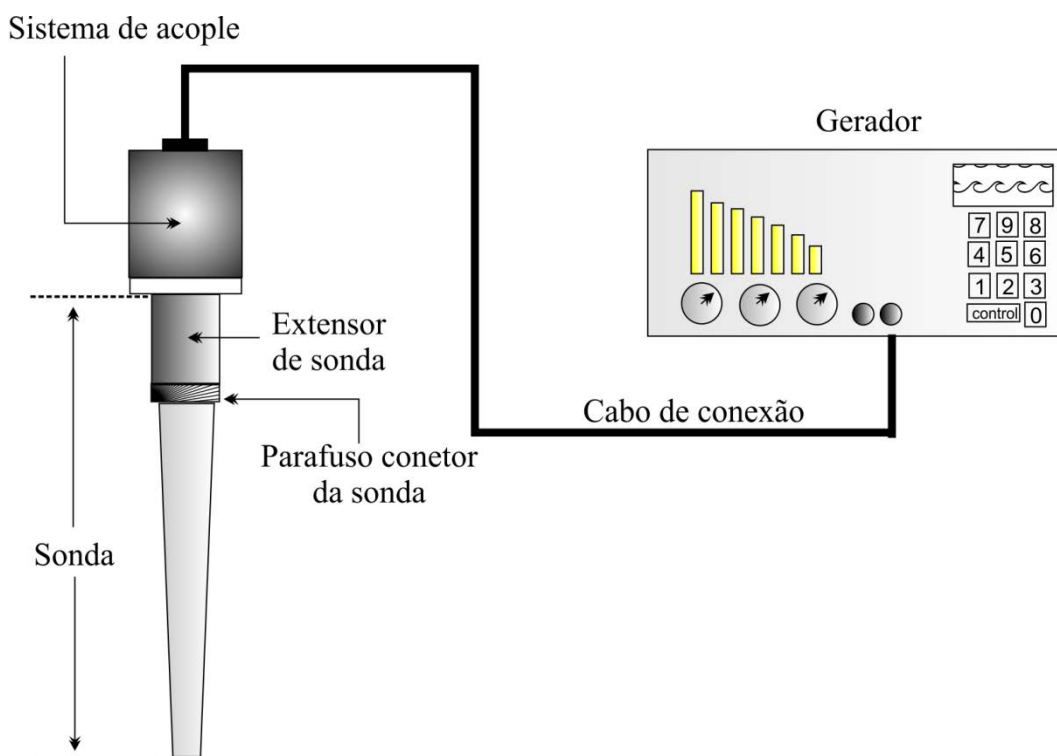


Figura 2.11. Sistema de sonda para aplicação de ultrassom de potência (LINGYU YU; GIURGIUTIU, 2009).

O material utilizado para a fabricação das sondas deve ter uma boa resistência à fadiga mecânica, baixas perdas acústicas e resistência à erosão que é produzida pela cavitação. Os materiais mais utilizados são diferentes ligas de titânio (LINGYU-YU; GIURGIUTIU, 2009).

A geometria da sonda também tem grande importância. Para aplicações em líquidos, uma sonda de forma cilíndrica se limita a transmitir o sinal acústico produzido pelo

transdutor ao meio a tratar (Figura 2.12). Se a forma é cônica ou com uma redução de diâmetro exponencial, o sinal se amplificará seguindo a relação D/d , sendo D o diâmetro do transdutor e d o diâmetro da ponta da sonda, isto é, a superfície emissora. Se a forma é escalonada o ganho seguirá a relação D/d^2 . Neste caso, para evitar um stress mecânico importante, o degrau deve situar-se no ponto nodal da sonda, já que a vibração neste ponto é zero. Muitos sistemas são projetados para operar com sondas intercambiáveis de diferentes diâmetros, alternando então a área da superfície emissora (KUTTRUFF, 1991; CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

Um aspecto importante de ser considerado nestes sistemas é o desgaste que sofrem as sondas. A cavitação que gerada no meio produz um grande stress mecânico que ocasiona a erosão da ponta da sonda. Desta maneira, formam-se irregularidades na superfície da sonda que impedem a correta emissão de ondas planas. Devido a este fenômeno, se produzem várias ondas que se anulam parcialmente entre si. Isto resulta em uma perda de eficiência na geração e emissão de ultrassom. A erosão também provoca a diminuição do comprimento total da sonda que deixa de ser um múltiplo de meio comprimento de onda. Como consequência, o sistema deixa de estar otimizado geometricamente e a intensidade emitida é reduzida. Muitos sistemas apresentam sondas com pontas descartáveis, de modo que não há necessidade de trocar a sonda inteira, quando nesta aparece erosão. Isto resulta em uma economia considerável, devido ao elevado preço destes tipos de sondas (LINGYU-YU; GIURGIUTIU, 2009).

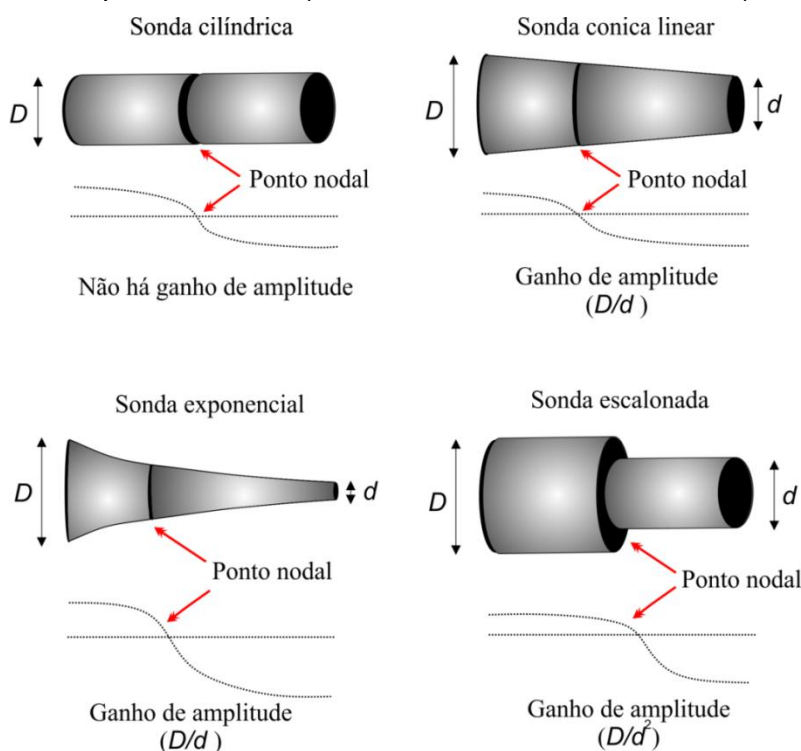


Figura 2.12. Diferentes tipos de sondas acústicas e seus fatores de amplificação (CAPOTE; DE CASTRO, 2007).

Há também sondas para aplicações em gases. Um dos principais problemas, neste caso, é conseguir uma boa adaptação entre o transdutor e o meio onde se deseja introduzir o ultrassom. Em meios líquidos isto se torna relativamente fácil, porém, os meios gasosos apresentam uma baixa impedância acústica específica e uma elevada absorção acústica, o que dificulta a adaptação com o transdutor e a transmissão de ultrassom em seu meio. Para evitar estes problemas nas sondas, o emissor tem a forma de um prato com um perfil escalonado, onde se consegue uma boa adequação com sistemas gasosos, amplitude de vibração e uma elevada direcionalidade (Figura 2.13) (GALLEGO-JUÁREZ, 2002).

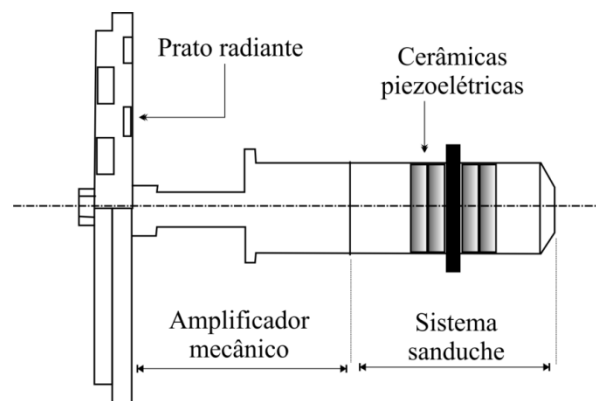


Figura 2.13. Estrutura de um transdutor de prato escalonado (GALLEGO-JUÁREZ, 2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Matéria prima e preparo das amostras

Para a pesquisa foi utilizado o miolo da paleta bovina (Figura 3.1), adquirido em um açougue local da cidade de São Jose do Rio Preto, SP. A carne foi levada para o Laboratório de Medidas Físicas do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da Unesp, onde foi armazenada a 10 °C em uma câmara fria.

Para os experimentos de desidratação osmótica, foi retirado o excesso de gordura e membranas presentes na carne com auxílio de uma faca. Após limpeza, o miolo foi cortado em cubos de aproximadamente 2 cm de aresta (Figura 3.2), sempre na direção perpendicular às fibras, a fim de obter amostras o mais homogêneas possíveis.

Após o corte, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos herméticos (Figura 3.3) e congeladas em um freezer à temperatura de -35 °C até posterior uso nos experimentos. Antes de cada experimento, as amostras foram lentamente descongeladas à temperatura constante de 2 °C durante 18 horas, conforme descrito por Cárcel et al., (2007).



Figura 3.1. Miolo da paleta utilizado nos experimentos de desidratação osmótica.



Figura 3.2. Miolo da paleta cortado em cubos.



Figura 3.3. Amostras acondicionadas em sacos plásticos herméticos.

Para o preparo das soluções osmóticas, cloreto de sódio (NaCl) de grau analítico com 98 % de pureza (LabSynth®, Diadema, Brasil), peso molecular de 58,44 e cloreto de sódio comercial comum foram utilizados para os diferentes experimentos nesta pesquisa.

O NaCl analítico foi dissolvido em água destilada, previamente degaseificada, obtendo concentrações de 0,040, 0,080, 0,120, 0,160, 0,020 e 0,240 kg NaCl·kg Solução⁻¹ que foram empregadas para os testes de determinação das propriedades físicas e térmicas.

O NaCl comercial comum foi previamente seco em estufa a 105 °C, até peso constante, e resfriado em dessecador antes da sua utilização. Após armazenamento, o NaCl foi dissolvido em água destilada, previamente degaseificada, obtendo concentrações de 0,044, 0,075, 0,150, 0,225 e 0,256 kg NaCl·kg Solução⁻¹ que foram empregadas para os ensaios de desidratação osmótica assistida com ultrassom.

Todas as soluções foram agitadas até a dissolução completa do sal e colocadas em frascos de vidro herméticos para serem usados nos procedimentos experimentais. Além disso, todas as preparações das amostras foram realizadas em temperatura ambiente e os

diferentes pesos do cloreto de sódio foram medidos em uma balança analítica modelo AUX220 (Shimadzu, Kyoto, Japão).

3.2. Descrição do equipamento de ultrassom

Para os ensaios de desidratação osmótica assistida com ultrassom foi empregado o processador ultrassônico modelo UP 400S (Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Alemanha) (Figura 3.4), adaptado com uma sonda cilíndrica de titânio modelo H22L2D (Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Alemanha) (Figura 3.5) de 22 mm de diâmetro e comprimento aproximado de 200 mm. O equipamento UP 400S opera a uma frequência de 20 kHz e potência nominal máxima de 400 W, contando com um regulador de potência transmitida, que pode variar desde 0 % até 100 %. Este também pode operar com pulsos intermitentes, com tempo máximo de um segundo com aplicação de ultrassom e um segundo sem.



Figura 3.4. Processador ultrassônico modelo UP 400S.



Figura 3.5. Sonda de titânio modelo H22L2D.

3.3. Caracterização química do miolo da paleta bovina

Amostras do miolo da paleta bovina foram trituradas e homogeneizadas antes do início de cada procedimento analítico de acordo com o método oficial AOAC 983.18 (AOAC, 1997). Os métodos de análises químicas realizados nas amostras são indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Descrição das análises químicas para o miolo da paleta bovina.

Análise	Método	Princípio	Referência
Umidade e materiais voláteis	Gravimétrico	Secagem por estufa a 105 °C por 10 h, e medição da diferença dos pesos entre os materiais in natura e secos.	Método oficial AOAC 950.46 (AOAC, 1997)
Lipídios	Bligh e Dyer	Extração com clorofórmio, metanol e água, seguido de evaporação do solvente do extrato e medição da quantidade de lipídios na amostra	Bligh e Dyer (1959)
Proteínas	MicroKjeldahl	Digestão do material orgânico e determinação titulométrica (meio ácido) empregando o Fator F = 6.25	Método oficial AOAC 984.13 (AOAC, 1997)
Cinzas	Incineração por mufla	Calcinação a 550 °C e medição da diferença de pesos entre o material in natura e calcinado	Método oficial AOAC 900.02 (AOAC, 1997) Método Ba 5a – 49 (AOCS, 2009)

3.4. Determinação das propriedades termo-físicas das soluções de cloreto de sódio

3.4.1. Densidade

A densidade (ρ , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) das soluções de cloreto de sódio foi determinada por peso (em escalas) em uma balança analítica modelo AUX220 (Shimadzu, Kyoto, Japão) usando um picnômetro graduado de 25 ml (Brand, Wertheim, Alemanha) equipado com uma capela e termômetro (± 0.1 °C). As medições foram efetuadas nas temperaturas de 4, 12, 20, 36, 44 e 52 °C, sendo cada temperatura mantida por um banho termostático modelo MA-159 (Marconi, São Paulo, Brasil). Para cada medida de temperatura, o picnômetro foi calibrado com água destilada de acordo com o procedimento padrão do método oficial AOAC 985.19 (AOAC, 1997).

3.4.2. Calor específico

O calor específico (C_p , $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) foi medido por calorimetria diferencial de varredura usando um equipamento DSC 8000 (Perkin Elmer, Shelton, USA). O equipamento

DSC foi previamente calibrado com índio (T.f. 156,6 °C, $\Delta H_f = 28,45 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) a uma taxa de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Gás nitrogênio (99.5% de pureza) foi usado como gás de purga a um fluxo de $\sim 20 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Panelas de alumínio de $24.01 \pm 0.04 \text{ mg}$ de peso (ref. 0219-0062, Perkin Elmer, USA) foram usadas para a linha base, assim como também para o material de referência (ARCHER, 1993), disco de safira de 3 mm de diâmetro (ref. 0219-1268, Perkin Elmer, USA), e as soluções de cloreto de sódio. As amostras foram seladas e pesadas antes de cada procedimento experimental. A linha base, material de referência e amostras foram submetidas ao seguinte programa de temperatura: isotérmico a 0 °C por 4 min, taxa de aquecimento a $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ até 56 °C e isotérmico a 56 °C por 4 min, de acordo com os procedimentos da “American Society for Testing and Materials” método ASTM-E1269 (ASTM, 2005). O programa do software PYRIS 11.0 (Perkin Elmer, Shelton, USA) foi usado para analisar e plotar os dados do programa térmico. O calor específico das soluções de cloreto de sódio foi calculado usando a Eq. 3.1.:

$$c_p = \frac{D_s}{W_s \theta} \quad (3.1)$$

onde D_s é o deslocamento vertical entre as curvas térmicas da amostra e o material de referência a uma determinada temperatura (mW), W_s é o peso da amostra (mg) e θ é a taxa de aquecimento ($^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$).

3.4.3. Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica (μ , $\text{mPa}\cdot\text{s}$) das soluções de cloreto de sódio foi determinada na faixa de temperatura de 4 – 52 °C empregando um reômetro modelo AR 2000 (TA Instruments, New Castle, Inglaterra) com geometria cone-placa (disco de 60 mm, ângulo de 4°) sob controle de tensão e temperatura. A viscosidade foi medida na rampa de taxa de deformação $1 - 200 \text{ s}^{-1}$ para cada temperatura e concentração estudada. O procedimento experimental foi primeiramente testado por um estudo reológico de etileno glicol e clorobenzeno (POLIZELLI et al., 2003). Todas as medidas reológicas foram realizadas para soluções aquosas preparadas ao instante e os dados foram analisados através do software do reômetro.

3.4.4. Condutividade térmica

A condutividade térmica (k , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) das soluções de cloreto de sódio foi medida usando um cilindro coaxial duplo (Figura 3.6) contendo uma resistência interna (comprimento de 220 mm e diâmetro de 10 mm), que proporciona um fluxo de calor uniforme. As amostras foram colocadas no espaço anular entre o cilindro interno e o cilindro

externo (diâmetro interno de 20 mm e diâmetro externo de 24 mm, ambos com comprimento de 220), que foram vedados nas extremidades com tampas de nylon para evitar a transferência de calor axial (TELIS-ROMERO et al., 1998). O aparato foi imerso em um banho termostático modelo MA-184 (Marconi, São Paulo, Brasil) com água. A entrada de energia para a resistência foi controlada através de uma fonte de alimentação modelo MPS-3006D (Minipa, São Paulo, Brasil), que permite o ajuste da corrente com uma estabilidade de 0.05 %. As temperaturas foram monitoradas por meio de um sistema de aquisição de dados modelo NI 9213 (National Instruments, Austin, USA) e a coleta de dados foi realizada pelo programa LabVIEW escrito em pseudocódigo “virtual instruments” (VIs). As temperaturas foram medidas por quatro termopares de cobre-constantano fixados nas superfícies dos cilindros interno e externo. A condução de calor unidimensional em regime permanente dentro da célula foi descrito pela equação de Fourier em coordenadas cilíndricas, com as condições de contorno correspondente à transferência de calor entre as duas superfícies cilíndricas concêntricas mantendo as temperaturas constantes (TELIS-ROMERO et al., 1998; TELIS-ROMERO et al., 2000).

Matematicamente, a condutividade térmica das amostras pode ser calculada pela Eq. 3.2 através das medições experimentais da temperatura e da geometria, em condições de estado estacionário (BELLET; SENGELIN; THIRRIOT, 1975):

$$k = \dot{q} \frac{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi l (T_1 - T_2)} \quad (3.2)$$

onde $\dot{q}$ é o fluxo de calor da resistência térmica (W), R_1 e R_2 são os raios do cilindros externo e interno (m) respetivamente, l o comprimento da célula (m), T_1 a temperatura em estado estacionário do cilindro interno (°C) e T_2 a temperatura em estado estacionário do banho termostático onde a célula foi imersa (°C).

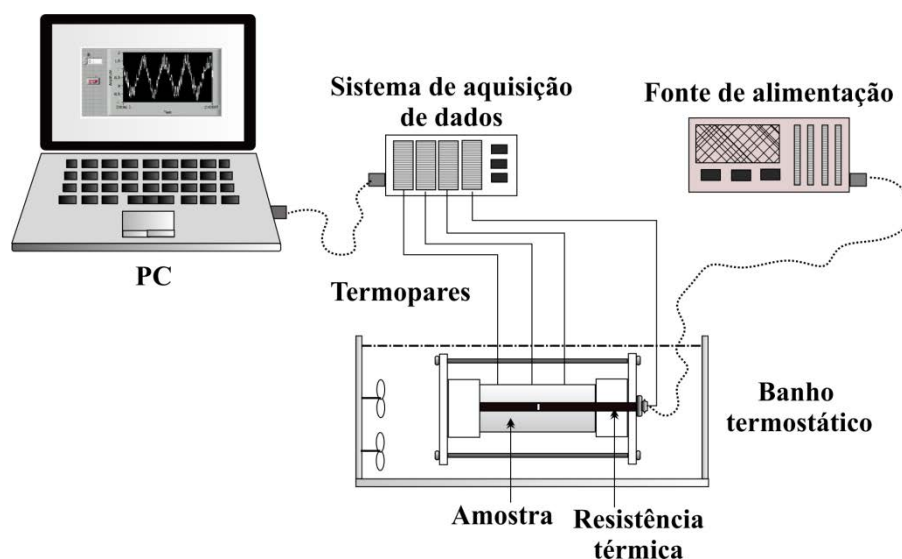


Figura 3.6. Ilustração da montagem experimental para a determinação da condutividade térmica.

3.4.5. Análise adimensional

Em complementação à determinação das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio, foi realizada uma análise adimensional usando os resultados experimentais das propriedades C_p , μ , and k , a fim de avaliar o número de Prandtl (P_r , adimensional) descrito pela Eq. 3.3.:

$$P_r = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.3)$$

O número de Prandtl correlaciona a taxa de difusão viscosa, ou seja a transferência de quantidade de movimento, com a taxa de difusão térmica, ou transferência de quantidade de calor. Quando o número de Prandtl é grande, fisicamente, isto significa que a transferência de velocidade no meio predomina. Analogamente, quando o número de Prandtl apresenta valores pequenos, tem-se maior troca de calor.

3.5. Ensaios de desidratação osmótica assistida com ultrassom

Nesta pesquisa foi determinada a influência da aplicação de ultrassom durante a desidratação osmótica de carne bovina, objetivando entender este tipo de processo combinado que vem ganhando lugar nos processos envolvendo alimentos. Para isto, foi realizado um planejamento experimental central composto para obter uma combinação entre os parâmetros: potencia nominal (P , W) e concentração da solução de cloreto de sódio (x , g NaCl·g Solução⁻¹), como descrito na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Desenho experimental central composto para o processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom.

Ensaio	P	x	Código
1	200	0,075	x0,075P200
2	200	0,225	x0,225P200
3	300	0,075	x0,075P300
4	300	0,225	x0,225P300
5	180	0,150	x0,15P180
6	320	0,150	x0,15P320
7	250	0,044	x0,044P250
8	250	0,256	x0,256P250
9(C)	250	0,150	x0,15P250(C)
10(C)	250	0,150	x0,15P250(C)

P: potencia nominal (W), x: concentração da solução de cloreto de sódio (g NaCL·g Solução⁻¹) e C: componentes centrais do desenho experimental.

Após as condições de concentração e potência ultrassônica nominal estarem definidas e as amostras e as soluções estarem devidamente preparadas, os experimentos de desidratação osmótica foram realizados. Para cada condição estabelecida foram realizados experimentos com tempos de 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos de duração. Ao tempo 0, corresponde a umidade da carne *in natura*, ou seja, sem passar pelo processo de desidratação.

Durante a desidratação osmótica, 1000 g de solução, preparados em um béquer, eram colocados em um banho termostático modelo MA159/BD30 (Marconi, São Paulo, Brasil), de modo que a temperatura fosse constante durante o processo (10 ± 2 °C). O ultrassom era então acionado (Figura 3.7a). Quando a temperatura da solução, que era monitorada através de um termômetro (termopar do tipo K) inserido no interior do béquer, finalmente estabilizava, em aproximadamente 10 °C, as amostras eram então colocadas na solução (Figura 3.7b).

Para cada experimento, foram utilizadas 3 amostras que ao término do tempo eram retiradas, imersas por 30 segundos em água destilada retirando o sal aderido da superfície (CÁRCEL et al., 2007), para posterior determinação do conteúdo de umidade. A umidade foi determinada de acordo com o método AOAC descrito no Item 3.3, onde as amostras foram acondicionadas em pesa filtros de 50 mm de diâmetro e 35 mm de altura e então levados para estufa à 105 °C, até peso constante (em torno de 10 h). A umidade foi então determinada pela diferença de peso entre a amostra *in natura* e seca.

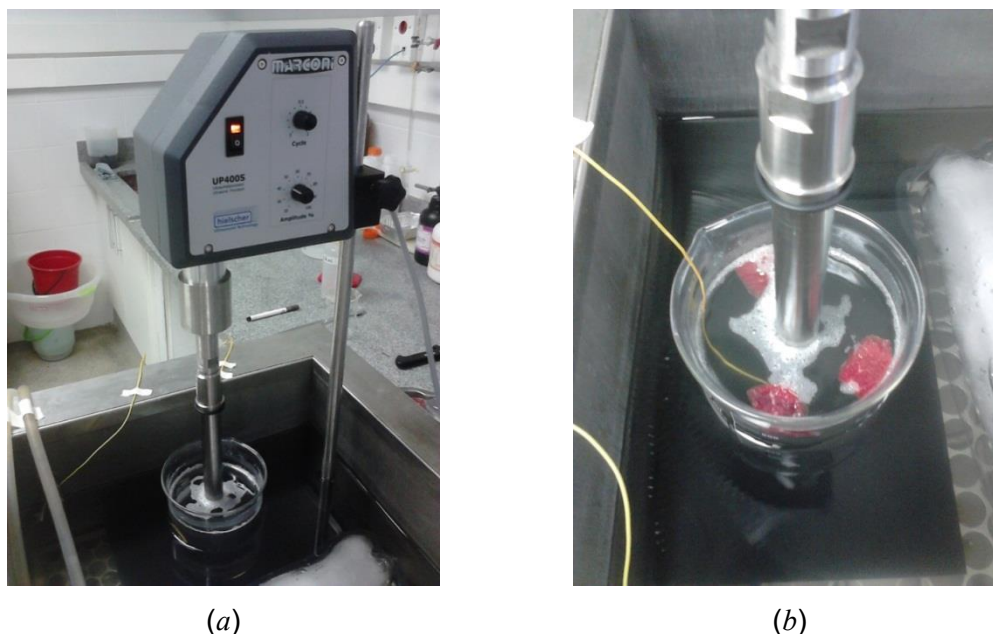


Figura 3.7. Estabilização da temperatura antes da desidratação osmótica (a) e desidratação osmótica em curso (b).

3.6. Modelagem matemática e análise estatística dos diferentes estudos realizados

No presente trabalho, foram analisadas equações empíricas e semi-empíricas para modelar as propriedades físicas e térmicas de cloreto de sódio e o processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom. Todas as modelagens foram abordadas usando as funções do programa computacional Matlab® R2013b (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA).

Para a modelagem e simulação das propriedades (ρ , C_p , μ e k) foi realizada inicialmente uma análise para estabelecer a significância das variáveis: concentração de cloreto de sódio e temperatura, através da função Matlab “anovan” de análise de variância múltipla com um $\alpha = 95\%$. Uma vez verificada a influência das variáveis sob as propriedades, foram construídos os modelos para simulação. A modelagem foi realizada usando as funções Matlab “nlinfit” e “nlparci” que realiza a regressão não-linear e determina os intervalos de confiança com $\alpha = 95\%$, respectivamente.

Para a modelagem e simulação do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom, foram testados modelos semi-empíricos a fim de encontrar um modelo de representação (regressão não-linear) da redução do conteúdo de umidade em função do tempo, para as diferentes condições estabelecidas (concentração de cloreto de sódio e potência de ultrassom). Além disso, uma regressão pelo método “stepwise regression” ou “passo a passo”, foi aplicado através da função Matlab “stepwisefit” para selecionar a melhor combinação dos fatores com base na adição ou exclusão de termos do modelo, sendo

avaliados a partir de um teste de significância ($p < 0,05$) (CEVIK, 2007). Assim, o modelo estabelecido por um procedimento passo a passo compreende o conjunto de indicadores que têm um importante efeito sobre as variáveis dependentes e que melhor explica a resposta, de acordo com as interações que devem ser consideradas (CHEN et al., 2013; GOODENOUGH; HART; STAFFORD, 2012).

Todos os dados calculados através dos diferentes modelos elaborados e testados foram avaliados através de análise dos residuais e de distribuição normal através da função Matlab "lilietest".

Para todas as análises, a qualidade do modelamento foi verificada através do ajuste do coeficiente de correlação (R^2_{adj}) Eq. 3.4 e o erro médio relativo (MRE) Eq. 3.5 (CANO-HIGUITA et al., 2013).

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-n_p} \right) (1 - R^2) \quad (3.4)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - Y_i^*|}{Y_i^*} \quad (3.5)$$

onde R^2 é o coeficiente de correlação entre os dados experimentais e calculados pelo modelo correspondente, Y e Y^* representam os valores experimentais e calculados, respectivamente, n é o número de valores experimentais, e n_p é o número de parâmetros no modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise química

Foi realizada uma análise química do miolo da paleta bovina de acordo com as metodologias oficiais da AOAC e AOCS para este tipo de produto. Os resultados experimentais da triplicata são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Composição química do miolo de paleta bovina.

Componente	Resultados experimentais				Desvio padrão	cv (%)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Média		
Umidade (%)	75,200	75,667	75,712	75,526	0,284	0,376
Proteína (%)	21,500	20,730	21,083	21,104	0,386	1,827
Lipídios (%)	2,473	2,456	2,196	2,375	0,155	6,532
Cinzas (%)	1,154	1,172	1,179	1,168	0,013	1,087

a, b, c: dados experimentais, cv: coeficiente de variação da triplicata (%).

Os resultados obtidos na Tabela 4.1 mostraram valores similares aos reportados por Babiker et al., (1990) para carne de cabra e cordeiro, assim como também aos reportados por Padre et al., (2006) para o músculo de touro e valores de lipídios similares ao músculo de novilho. Assim, desde um ponto de vista de qualidade química, o miolo da paleta bovina não é inferior a outras espécies ruminantes. Devido ao seu baixo preço que pode substituir outros cortes superiores e tendo em conta sua capacidade de retenção de água, este produto *in natura* pode-se tornar uma boa matéria-prima para produtos de carne processados.

4.2. Resultados experimentais das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio

Os valores experimentais da densidade, calor específico, viscosidade dinâmica e condutividade térmica foram determinados experimentalmente no intervalo de temperatura de 0 – 52 °C e concentrações de cloreto de sódio de 0.04 – 0.24 kg NaCl·kg solução⁻¹. Os resultados da média e o desvio padrão para cada valor experimental são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Densidade, calor específico, viscosidade dinâmica e condutividade térmica das soluções de cloreto de sódio a diferentes temperaturas*.

T (°C)	x (kg NaCl·kg solução ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c_p (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	μ (mPa·s)	k (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
4,0	0,04	1027,8 ± 11,5	4,007 ± 0,001	1,521 ± 0,030	0,585 ± 0,001
	0,08	1050,2 ± 14,2	3,843 ± 0,003	1,696 ± 0,023	0,560 ± 0,004
	0,12	1089,0 ± 12,1	3,690 ± 0,010	1,902 ± 0,022	0,549 ± 0,005
	0,16	1118,3 ± 9,6	3,544 ± 0,003	2,056 ± 0,003	0,531 ± 0,001
	0,20	1150,3 ± 10,4	3,421 ± 0,012	2,134 ± 0,005	0,513 ± 0,004
	0,24	1170,5 ± 13,8	3,312 ± 0,018	2,198 ± 0,010	0,490 ± 0,003
12,0	0,04	1015,2 ± 16,4	4,005 ± 0,005	1,221 ± 0,003	0,582 ± 0,004
	0,08	1045,5 ± 17,2	3,840 ± 0,005	1,360 ± 0,006	0,565 ± 0,003
	0,12	1080,3 ± 9,3	3,686 ± 0,005	1,523 ± 0,007	0,549 ± 0,002
	0,16	1117,2 ± 9,6	3,545 ± 0,003	1,648 ± 0,009	0,535 ± 0,002
	0,20	1136,3 ± 18,7	3,421 ± 0,002	1,728 ± 0,038	0,511 ± 0,004
	0,24	1172,7 ± 10,4	3,318 ± 0,002	1,796 ± 0,025	0,500 ± 0,001
20,0	0,04	1024,2 ± 4,1	3,999 ± 0,019	1,002 ± 0,028	0,590 ± 0,002
	0,08	1049,4 ± 7,4	3,843 ± 0,004	1,118 ± 0,026	0,581 ± 0,004
	0,12	1085,8 ± 5,8	3,690 ± 0,004	1,234 ± 0,010	0,558 ± 0,001
	0,16	1115,5 ± 6,0	3,553 ± 0,013	1,351 ± 0,010	0,536 ± 0,003
	0,20	1147,4 ± 2,6	3,424 ± 0,001	1,420 ± 0,009	0,520 ± 0,003
	0,24	1178,5 ± 3,2	3,322 ± 0,006	1,480 ± 0,011	0,501 ± 0,005
28,0	0,04	1020,2 ± 9,5	4,011 ± 0,009	0,841 ± 0,035	0,599 ± 0,001
	0,08	1050,8 ± 5,7	3,848 ± 0,011	0,937 ± 0,039	0,581 ± 0,001
	0,12	1086,9 ± 6,8	3,694 ± 0,011	1,047 ± 0,043	0,557 ± 0,003
	0,16	1101,3 ± 14,4	3,551 ± 0,006	1,130 ± 0,034	0,540 ± 0,003
	0,20	1144,3 ± 5,8	3,428 ± 0,006	1,189 ± 0,036	0,522 ± 0,003
	0,24	1167,8 ± 8,0	3,323 ± 0,006	1,241 ± 0,037	0,506 ± 0,006
36,0	0,04	1017,0 ± 2,8	4,011 ± 0,007	0,715 ± 0,010	0,604 ± 0,001
	0,08	1046,2 ± 1,1	3,852 ± 0,019	0,803 ± 0,010	0,583 ± 0,005
	0,12	1078,9 ± 3,3	3,688 ± 0,008	0,880 ± 0,010	0,568 ± 0,002
	0,16	1120,0 ± 12,2	3,550 ± 0,004	0,953 ± 0,010	0,550 ± 0,001
	0,20	1138,5 ± 1,6	3,426 ± 0,003	1,005 ± 0,009	0,529 ± 0,004
	0,24	1170,4 ± 3,3	3,324 ± 0,003	1,052 ± 0,005	0,514 ± 0,003
44,0	0,04	1005,1 ± 17,2	4,011 ± 0,005	0,615 ± 0,017	0,605 ± 0,003
	0,08	1038,0 ± 4,4	3,842 ± 0,009	0,685 ± 0,016	0,591 ± 0,006
	0,12	1063,1 ± 10,0	3,690 ± 0,008	0,764 ± 0,006	0,576 ± 0,005
	0,16	1093,5 ± 7,7	3,553 ± 0,001	0,830 ± 0,006	0,551 ± 0,004
	0,20	1123,9 ± 9,7	3,433 ± 0,009	0,881 ± 0,006	0,536 ± 0,003
	0,24	1151,5 ± 12,6	3,324 ± 0,002	0,915 ± 0,007	0,518 ± 0,001
52,0	0,04	1005,2 ± 3,5	4,011 ± 0,011	0,536 ± 0,013	0,614 ± 0,003
	0,08	1041,4 ± 8,0	3,848 ± 0,011	0,597 ± 0,005	0,595 ± 0,002
	0,12	1056,1 ± 8,3	3,696 ± 0,010	0,666 ± 0,002	0,577 ± 0,001
	0,16	1094,7 ± 2,3	3,556 ± 0,007	0,723 ± 0,003	0,559 ± 0,003
	0,20	1126,9 ± 2,5	3,432 ± 0,007	0,765 ± 0,032	0,538 ± 0,003
	0,24	1147,9 ± 6,6	3,327 ± 0,007	0,802 ± 0,034	0,530 ± 0,008

* Média e desvio padrão da triplicata, T: temperatura (°C), x: concentração da solução de cloreto de sódio (NaCl·kg solução⁻¹).

Na Tabela 4.2 pode-se observar que a densidade e a viscosidade dinâmica aumentam com o aumento da concentração de sal, mostrando valores na faixa de 1005,2 ± 3,5 kg·m⁻³ a 1178,5 ± 3,2 kg·m⁻³ para ρ e de 0,536 ± 0,013 mPa·s a 2,198 ± 0,010 mPa·s para μ (fluido newtoniano) na faixa experimental. Por outro lado, o calor específico e a

condutividade térmica variam na faixa de $4,011 \pm 0,009 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ a $3,312 \pm 0,018 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ para C_p e de $0,490 \pm 0,003 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ a $0,614 \pm 0,003 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ para k .

Os dados experimentais das propriedades ρ , C_p , μ , e k foram comparadas, na mesma faixa de condições experimentais, com os reportados por outros autores a fim de determinar a validade do procedimento experimental empregado no estudo. Assim, os dados experimentais da densidade foram muito próximos aos reportados por Pitzer et al., (1984), mostrando pouca variação na faixa de concentração de sal e temperaturas estudadas. A viscosidade dinâmica mostrou uma forte dependência da temperatura, sendo inicialmente observada por Kestin et al., (1981) em concentrações de 0 – 0,35 kg NaCl·kg solução⁻¹ e temperaturas de 20 – 150 °C. Tendências similares foram obtidas por Moreira et al., (2003) para a viscosidade dinâmica de soluções de cloreto de sódio. Os dados da condutividade térmica se apresentaram na faixa dos encontrados por Ramires e Nieto de Castro (1994) em concentrações de sal de 0,013, 0,157 e 0,349 kg NaCl·kg solução⁻¹ na faixa de temperaturas de 25 – 90 °C. No entanto, os dados do calor específico foram menores que os valores reportados por Rogers e Pitzer (1982) em concentrações de sal de 0.005 – 0.234 kg NaCl·kg solução⁻¹ e temperaturas na faixa de 20 – 100 °C. Esta diferença no valor do calor específico pode ser atribuída ao método experimental utilizado no presente estudo, que calcula as alterações mínimas de energia em intervalos estreitos de temperatura para cada concentração de sal, enquanto que o método descrito por Rogers e Pitzer (1982) emprega equações teóricas e empíricas em função da temperatura e molaridade.

Algumas propriedades apresentaram diferenças frente aos dados relatados na literatura e que podem estar relacionados com a precisão do dispositivo de medição, como o caso das propriedades C_p e k que determinam as mudanças mínimas em ambas as propriedades quando a concentração de massa e temperatura aumenta. A informação bibliográfica utiliza modelos empíricos e semi-empíricos com a suposição de que essas propriedades dependem da concentração de sal e temperatura. Esta hipótese deve ser cuidadosamente avaliada, a fim de propor equações para simulação adequadas.

4.2.1. Modelagem matemática e análise estatística

Um teste de significância das variáveis, concentração de cloreto de sódio e temperatura foi aplicado sobre as propriedades ρ , c_p , μ , e k . A Tabela 4.3 mostra os resultados estatísticos com um $\alpha = 95 \%$. Ambas as variáveis apresentaram uma influência sob todas as propriedades mostrando um valor de $p < 0,05$. Particularmente, a concentração

de cloreto de sódio influenciou mais ($F > 839,5$) que a temperatura nas propriedades ρ , C_p , e k . A temperatura foi a variável que mais influenciou na propriedade μ ($F = 324,5$).

Tabela 4.3. Análise de variância das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio*.

Propriedade	Fator	S.S	G.L.	F	p
ρ (kg·m ⁻³)	x (kg NaCl·kg solução ⁻¹)	111275,4	5	989,6	$2,45 \times 10^{-32}$
	T (°C)	3094,2	6	22,9	$5,48 \times 10^{-10}$
	Erro	674,7	30		
	Total	115044,2	41		
C_p (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	x (kg NaCl·kg solução ⁻¹)	2,345	5	50687,6	$6,17 \times 10^{-58}$
	T (°C)	$3,4 \times 10^{-4}$	6	7,8	$3,98 \times 10^{-5}$
	Erro	$2,8 \times 10^{-4}$	30		
	Total	2,345	41		
μ (mPa·s)	x (kg NaCl·kg solução ⁻¹)	0,975	5	53,5	$4,73 \times 10^{-14}$
	T (°C)	7,098	6	324,5	$6,80 \times 10^{-26}$
	Erro	0,109	30		
	Total	8,183	41		
k (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	x (kg NaCl·kg solução ⁻¹)	$3,9 \times 10^{-2}$	5	839,5	$2,83 \times 10^{-31}$
	T (°C)	$4,7 \times 10^{-3}$	6	84,0	$2,11 \times 10^{-17}$
	Erro	$2,8 \times 10^{-4}$	30		
	Total	$4,4 \times 10^{-2}$	41		

*S.S: soma dos quadrados, d.f.: grau de liberdade, F: fator F, p: probabilidade do fator F, Erro: erro da S.S; Total: soma do S.S.

Modelos lineares, quadráticos, exponenciais e logarítmicos foram propostos para correlacionar a densidade, calor específico, viscosidade dinâmica e condutividade térmica, em função da concentração de cloreto de sódio e temperatura. Os resultados dos parâmetros de ajuste e estatísticos são mostrados na Tabela 4.4. Os valores estatísticos dos modelos propostos foram $R^2_{adj} = 0,988$ e $MRE(\%) = 0,432$ para ρ , $R^2_{adj} = 0,993$ e $MRE(\%) = 0,457$ para C_p , $R^2_{adj} = 0,967$ e $MRE(\%) = 5,015$ para μ e $R^2_{adj} = 0,991$ e $MRE(\%) = 0,434$ para k , indicando uma boa modelagem. Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são mostrados os valores experimentais e calculados para as propriedades ρ , C_p , μ e k , respectivamente, usando os correspondentes modelos de ajuste. Nelas é mostrada claramente as relações lineares das propriedades testadas com a concentração de cloreto de sódio para cada nível de temperatura. Ainda nas Figuras, pode ser observado em termos gerais que o efeito da concentração de cloreto de sódio é maior que a da temperatura.

Esta tendência foi descrita por Seddon et al. (2000) para a densidade e viscosidade quando a concentração molar de sal aumenta, enquanto o efeito da temperatura foi mínimo. O cloreto de sódio é solúvel em água devido a sua constante dielétrica alta e quando aumenta a concentração molar, as propriedades reológicas, físicas e térmicas variam de

forma linear até o ponto de saturação (PITZER; PEIPER; BUSEY, 1984; SEDDON; STARK; TORRES, 2000). Portanto, os modelos propostos podem ser aplicados para qualquer ponto dentro da faixa de concentração de cloreto de sódio de 0,04 a 0,24 kg NaCl·kg solução⁻¹ e temperatura de 4 a 52 °C. As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram a correlação entre os valores calculados pelos modelos experimentais e, adicionalmente, os resíduos entre os valores experimentais e calculados mostrados por uma distribuição de Gauss (normal).

Tabela 4.4. Resultados dos parâmetros dos modelos e validação estatística das propriedades físicas e térmicas das soluções de cloreto de sódio.

Modelo ajustado	Parâmetros do modelo	I.C (95%)	R^2_{adj}	MRE (%)
$\rho = a + bx + cT^2$	$a = 995.3 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$	990.7 – 999.8	0.988	0.432
	$b = 753.3 \text{ (kg NaCl} \cdot \text{kg solução}^{-1}\text{)}$	727.2 – 779.3		
	$c = -8.442 \times 10^{-3} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{°C}^{-2}\text{)}$	-0.010 – -0.006		
$c_p = a + bx + T^c$	$a = 3.112 \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}\text{)}$	3.086 – 3.138	0.993	0.457
	$b = -3.448 \text{ (kg NaCl} \cdot \text{kg solução}^{-1}\text{)}$	-3.537 – -3.359		
	$c = 3.406 \times 10^{-3} \text{ (-)}$	-0.003 – 0.011		
$\mu = a + bx + c \ln T$	$a = 2.367 \text{ (mPa} \cdot \text{s)}$	2.254 – 2.481	0.967	5.015
	$b = 2.205 \text{ (kg NaCl} \cdot \text{kg solução}^{-1}\text{)}$	1.825 – 2.585		
	$c = -0.491 \text{ (mPa} \cdot \text{s)}$	-0.522 – -0.460		
$k = a + bx + cT$	$a = 0.596 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}\text{)}$	0.593 – 0.599	0.991	0.434
	$b = -0.448 \text{ (kg NaCl} \cdot \text{kg solução}^{-1}\text{)}$	-0.462 – -0.434		
	$c = 6.609 \times 10^{-4} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-2}\text{)}$	$6.02 \times 10^{-4} - 7.19 \times 10^{-4}$		

*a, b, c: parâmetros do modelo, I.C: intervalos de confiança, T: temperatura (°C); x: concentração de cloreto de sódio (kg NaCl·kg solução⁻¹)

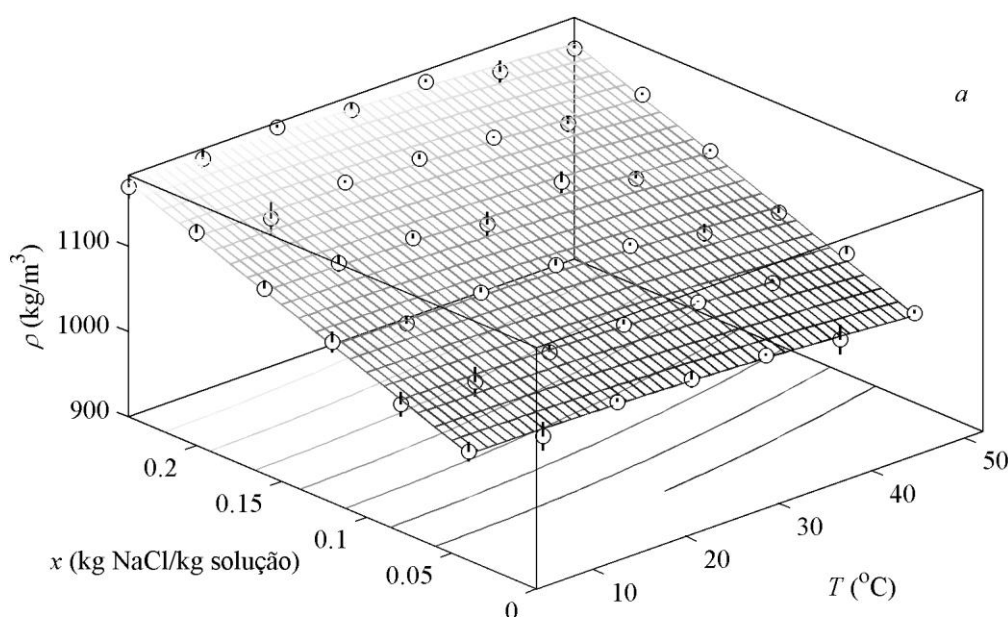


Figura 4.1. Dados experimentais (○) e calculados (□) da densidade das soluções de NaCl.

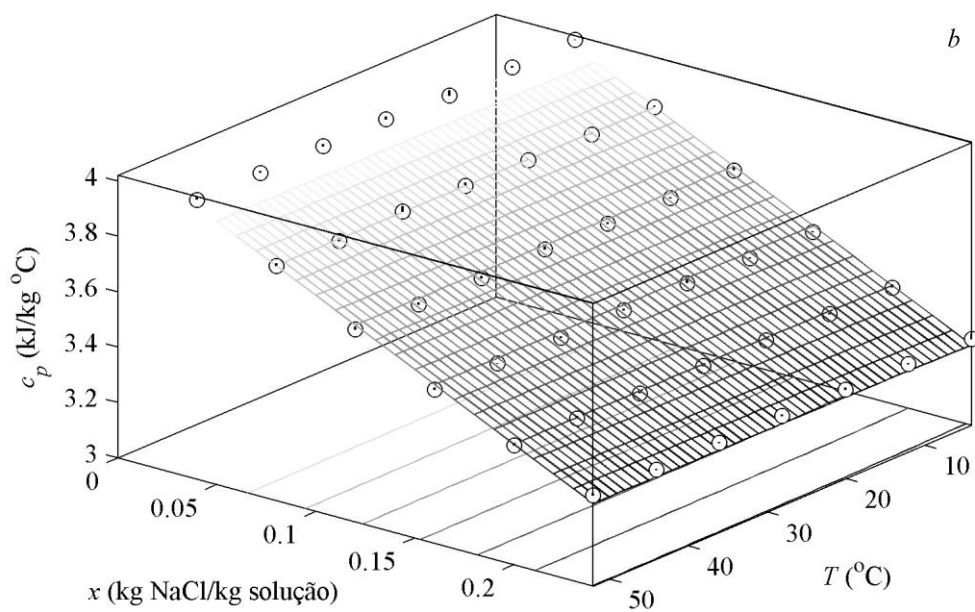


Figura 4.2. Dados experimentais (○) e calculados (□) do calor específico das soluções de NaCl.

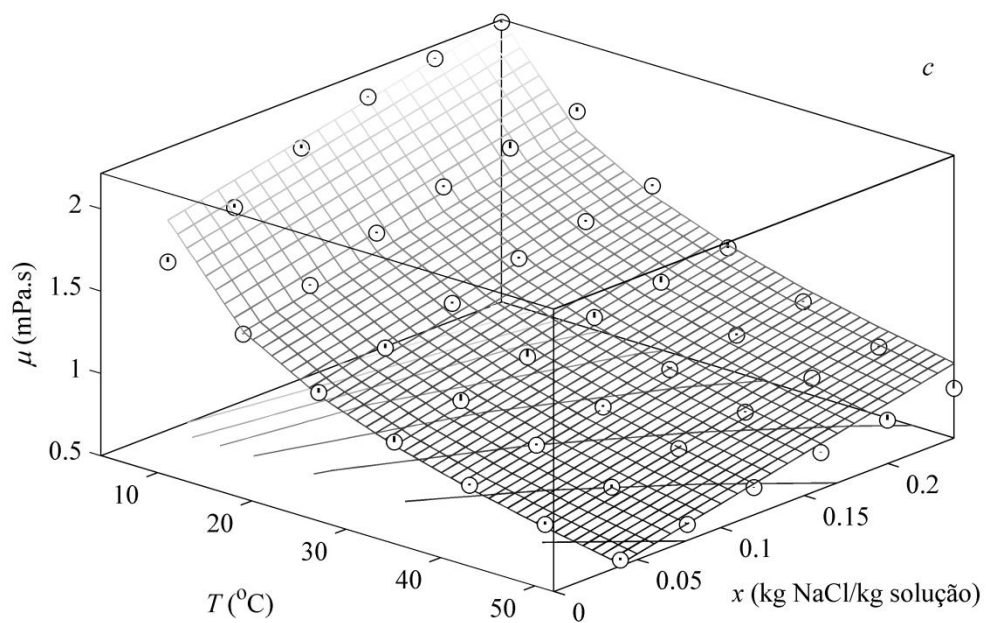


Figura 4.3. Dados experimentais (○) e calculados (□) da viscosidade dinâmica das soluções de NaCl.

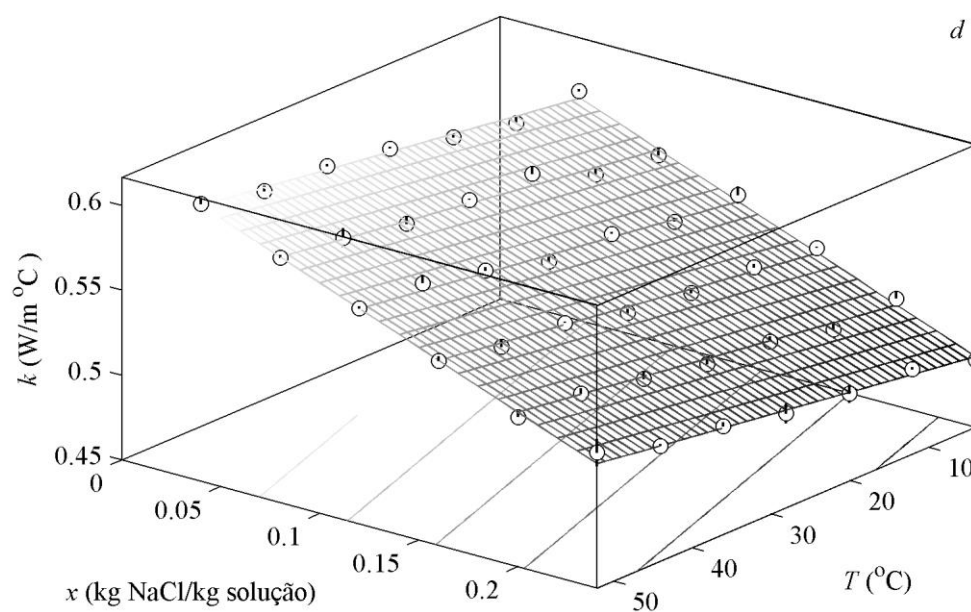


Figura 4.4. Dados experimentais (○) e calculados (□) de condutividade térmica das soluções de NaCl.

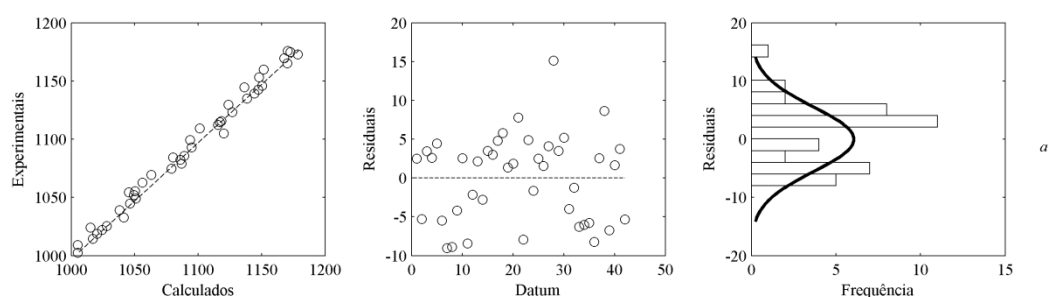


Figura 4.5. Análise de resíduos da densidade das soluções de NaCl.

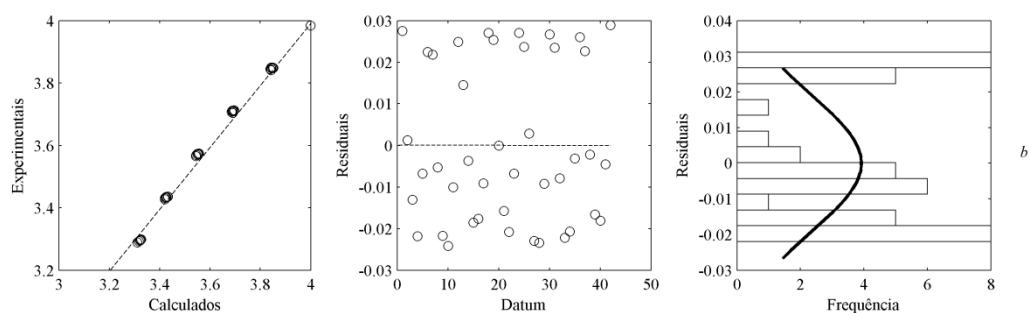


Figura 4.6. Análise de resíduos do calor específico das soluções de NaCl.

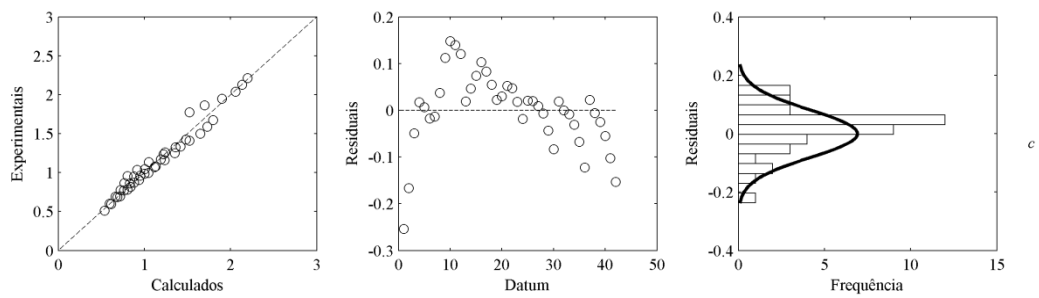


Figura 4.7. Análise de resíduos da viscosidade dinâmica das soluções de NaCl.

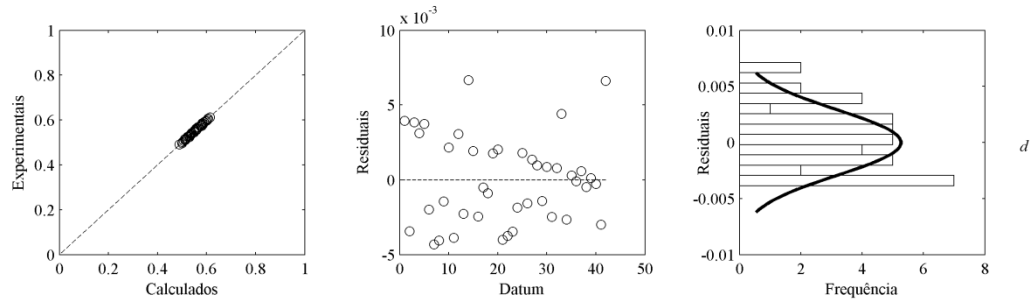


Figura 4.8. Análise de resíduos da condutividade térmica das soluções de NaCl.

4.2.2. Análise adimensional

O número adimensional de Prandtl (P_r) foi avaliado usando os valores experimentais das propriedades μ , c_p e k (Tabela 4.2). Além disso, seus respectivos modelos ajustados da Tabela 4.4 foram empregados para avaliar a eficiência do P_r calculado, como mostrado na Eq. 4.1.:

$$Pr = \frac{(3.112 - 3.448x + T^{3.406 \times 10^{-3}})(2.367 + 2.205x - 0.491 \ln(T))}{(0.596 - 0.448x + 6.609 \times 10^{-4}T)} \quad (4.1)$$

A Figura 4.9 mostra os dados experimentais e estimados do P_r na faixa de concentração de cloreto de sódio e temperatura estudada. No gráfico, observa-se uma acentuada diminuição dos valores do P_r quando a temperatura aumenta e, um ligeiro aumento quando a concentração de cloreto de sódio se torna maior. Além disso, pode-se observar uma boa correlação entre os valores do P_r avaliados a partir dos dados experimentais e estimados pela Eq. 4.1 (com desvios inferiores a 10% na maioria dos casos). Somente quatro pontos mostraram desvios maiores a 10 % com um máximo valor de 16,512 na concentração de cloreto de sódio de 0,24 kg NaCl·kg solução⁻¹ e temperatura de 52 °C. A Figura 4.10 mostra a análise dos residuais dos dados experimentais e calculados do P_r .

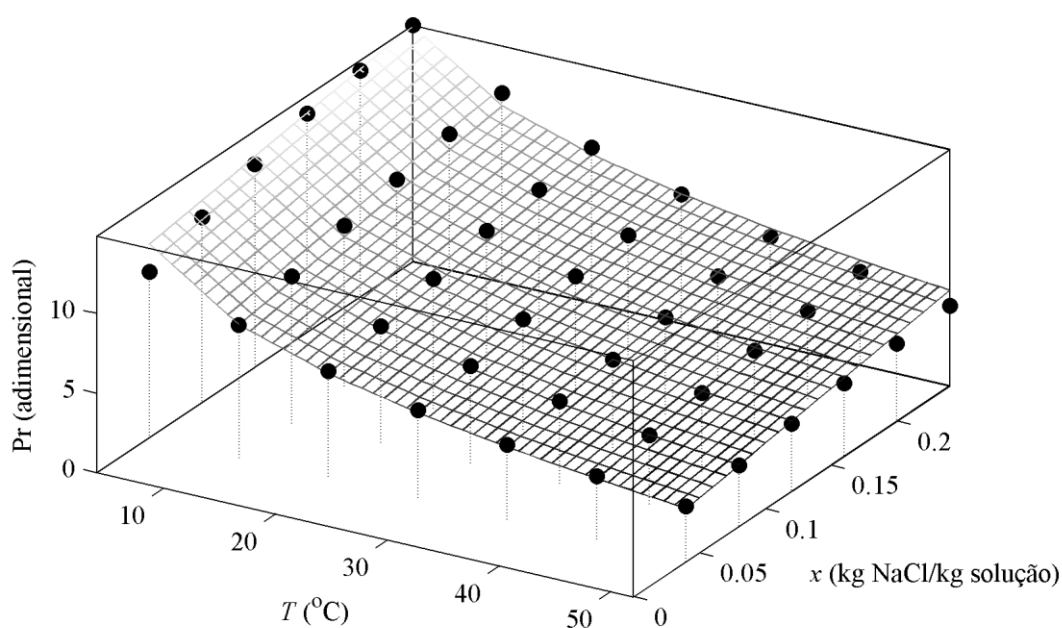


Figura 4.9. Valores experimentais (●) e calculados (□) do número de Prandtl através dos dados experimentais de ρ , μ e k e seus respectivos modelos ajustados.

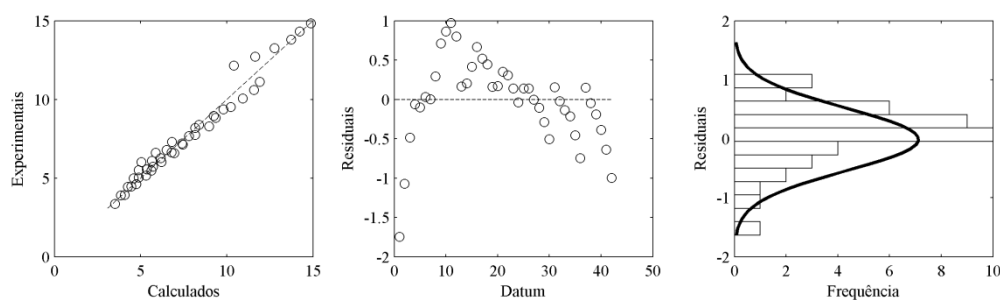


Figura 4.10. Análise de resíduos do número de Prandtl.

Valores do P_r de 3,50 a 14,86 indicam que a transferência de calor nas soluções é mais efetiva que a convecção, sendo esta tendência favorecida a baixa temperatura e alta concentração de cloreto de sódio. Estes resultados são coerentes aos de soluções semelhantes, tais como a água do mar, relatados por Sharqawy et al., (2010).

4.3. Ensaios de desidratação osmótica assistida com ultrassom

Experimentos de desidratação osmótica assistida com ultrassom de potência para os cubos de miolo da paleta bovina foram realizados de acordo com o planejamento experimental descrito na Tabela 3.2. O conteúdo de umidade para cada combinação de potência de ultrassom e concentração de cloreto de sódio foi determinado em intervalos de

tempo até completar 120 min (7200 s). A Tabela 4.5 mostra os resultados experimentais destes ensaios.

Tabela 4.5. Resultados do conteúdo de umidade do miolo de paleta bovina submetido a desidratação osmótica assistida com ultrassom.

t (s)	U (kg·kg ⁻¹ , b.s.)				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
	x0,075P200	x0,225P200	x0,075P300	x0,225P300	x0,15P180
0	3,3606	3,3606	3,3606	3,3606	3,3606
900	3,1528	2,4613	2,9433	2,1465	2,2781
1800	3,0021	2,3562	2,8376	2,0710	2,0382
2700	2,9767	2,2221	2,8079	2,1096	2,0133
3600	3,0028	2,2138	2,8883	2,0437	1,9642
5400	3,0050	1,7972	2,9048	1,8865	2,1063
7200	3,0027	1,9415	2,9053	1,8008	2,0542

t (s)	U (kg·kg ⁻¹ , b.s.)				
	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
	x0,15P320	x0,044P250	x0,256P250	x0,15P250	x0,15P250
0	3,3606	3,3606	3,3606	3,3606	3,3606
900	2,1821	2,6578	2,1759	2,2743	2,3580
1800	2,1384	2,2571	1,8023	2,1697	2,3255
2700	2,1681	1,9859	1,5371	2,0203	2,3132
3600	1,9425	2,5464	1,3611	2,2402	2,3464
5400	1,6473	2,4242	1,7763	2,2163	2,2549
7200	2,1618	2,3384	1,4637	2,1040	2,2010

* O número de ensaio corresponde à combinação das variáveis, onde x é a concentração em kg NaCl·kg solução⁻¹ e P a potência em W.

Na Tabela 4.5, observa-se que o conteúdo de umidade variou de 3,3606 até 1,4637 kg·kg⁻¹, b.s.) sendo que o ensaio 8 correspondente à combinação de potência de ultrassom (P) de 250 W e concentração de cloreto de sódio (x) de 0,256 kg NaCl·kg solução⁻¹ apresentou a maior diminuição do conteúdo de umidade. Além do ensaio 8, nos ensaios realizados sob as mesmas concentrações de NaCl, o aumento da potência ultrassônica promoveu uma maior redução na quantidade de água. Como pode ser observado nos ensaios 1 e 3 (concentração de 0,075 kg NaCl·kg solução⁻¹), a aplicação de ultrassom com potência de 200 W (Ensaio 1) reduziu a umidade do produto para 3,0027 kg·kg⁻¹, b.s., enquanto que a aplicação com 300 W reduziu para 2,9053 kg·kg⁻¹, b.s.. O mesmo pode ser observado para os ensaios 2 e 4 (concentração de 0,225 kg NaCl·kg solução⁻¹), onde a aplicação com 200 W reduziu a umidade para 1,9415 kg·kg⁻¹, b.s. e a aplicação com 300 W de potência reduziu para 1,8008 kg·kg⁻¹, b.s.. Este mesmo efeito foi observado e descrito por Cárcel et al., (2007) para intensidades e concentração de sal nas faixas de 5,2 – 75,8 W·cm⁻² e 0,18 – 0,43 kg NaCl·kg solução⁻¹, respectivamente.

4.3.1. Modelagem matemática do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom

Para modelar os valores experimentais de umidade (U , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b.s.) em função do tempo, para cada ensaio experimental, foi empregada a equação empírica proposta por Peleg (1988) Eq. 4.2:

$$X^w = X_0^w - \frac{t}{k_{1w} + k_{2w}t} \quad (4.2)$$

onde X^w : é o conteúdo de umidade calculado no tempo t ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b.s.), X_0^w : é o conteúdo de umidade inicial ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b.s.), k_{1w} e k_{2w} : os parâmetros do modelo de Peleg (s) e (s^{-1}) respectivamente e, t : é o tempo (s).

Figura 4.5 mostra os ajustes do modelo de Peleg com os dados experimentais. No gráfico, observa-se que a concentração de sal e a potência de ultrassom têm uma relação direta com a perda de umidade da amostra ao longo do tempo, sendo que os ensaios 8, 2 e 4 (como visto na Tabela 4.5) tiveram curvas mais pronunciadas.

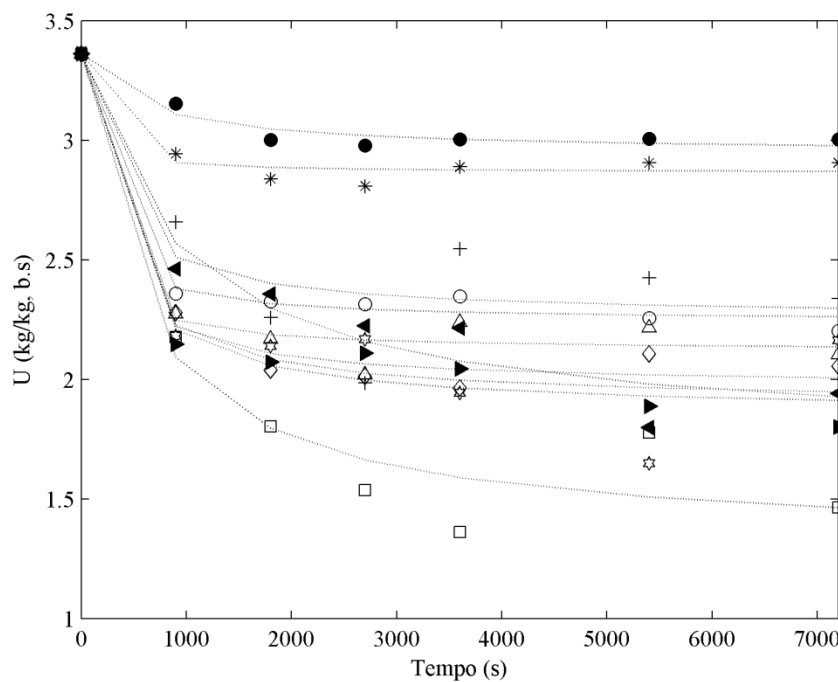


Figura 4.11. Dados experimentais dos ensaios (1 - x0,075P200 (●), 2 - x0,225P200 (◄), 3 - x0,075P300 (*), 4 - x0,225P300 (►), 5 - x0,15P180 (◊), 6 - x0,15P320 (⊙), 7 - x0,044P250 (+), 8 - x0,256P250 (□), 9 - x0,15P250 (Δ), 10 - x0,15P250 (○)) e calculados (····) empregando o modelo de Peleg.

Este comportamento das curvas experimentais mostradas na Figura 4.11, pode ser explicado segundo disse Mothibe et al., (2011), onde o ganho de soluto em um processo de desidratação osmótica é maior quando é aplicado ultrassom, sendo que difusão na fronteira entre um sólido e um líquido em suspensão é substancialmente acelerada, em um campo ultrassônico. Resultados obtidos no trabalho realizado por Simal et al. (1998), levaram a concluir que o ultrassom influencia no transporte de massa durante a desidratação osmótica, aumentando tanto a perda de água como o ganho de soluto.

Os valores calculados de umidade a partir do modelo de Peleg apresentaram uma correlação aceitável, com valores de R^2_{adj} oscilando entre 0,743 – 0,988 e MRE (%) entre 0,832 – 6,153, como mostrado na Tabela 4.6. Embora a correlação não fosse a mais esperada, o modelo de Peleg simulou o processo de desidratação osmótica nas diferentes condições de concentração de cloreto de sódio e potência de ultrassom, mostrando valores próximos aos experimentais (valores de $MRE < 10\%$). Figura 4.6, mostra a análise dos residuais com modelo de Peleg.

Tabela 4.6. Parâmetros de ajuste do modelo de Peleg.

Ensaio	Parâmetros estimados			R^2_{adj}	MRE (%)
	k_{1w}	k_{2w}	X_e^w		
1	1378,3	2,416	2,946	0,931	0,832
2	579,7	0,617	1,740	0,931	3,849
3	165,9	2,014	2,864	0,935	1,189
4	182,4	0,665	1,856	0,973	3,058
5	141,4	0,719	1,968	0,978	2,700
6	178,4	0,683	1,896	0,878	6,153
7	241,6	0,907	2,257	0,743	6,486
8	267,8	0,490	1,319	0,937	6,341
9	83,6	0,805	2,117	0,965	2,551
10	111,4	0,895	2,243	0,988	1,200

k_{1w} e k_{2w} : parâmetros do modelo de Peleg (s) e (s^{-1}) respectivamente, X_e^w : umidade de equilíbrio ($kg \cdot kg^{-1}$, b.s.).

Na Tabela 4.6, observa-se que os dois parâmetros do modelo de Peleg apresentam ordens de magnitude elevadas entre cada condição experimental. Portanto, não é possível encontrar uma correlação geral entre os parâmetros com relação à potência de ultrassom e concentração de cloreto de sódio. Na literatura, não existe muita documentação sobre a aplicação da equação de Peleg para a descrição de desidratação osmótica de produtos alimentícios. Chabbouh et al., (2012) reportaram, durante a salga de carne “kaddid”, valores de k_{1w} próximos de 0,1, e de k_{2w} variando de 0,4 – 0,9, em solução de cloreto de sódio 15 %. Corzo (2006) encontrou valores de k_{2w} entre 1 – 2, durante a desidratação osmótica de fatias

de sardinha. Além destes valores, a umidade de equilíbrio (X_e^w , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.) foi determinada através da relação entre a umidade inicial e a constante de capacidade (k_{2w}) do modelo de Peleg (Eq. 4.3):

$$X_e^w \equiv X_0^w - \frac{1}{k_{2w}} \quad (4.3)$$

onde X_e^w é a umidade de equilíbrio quando o tempo tende a infinito ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.).

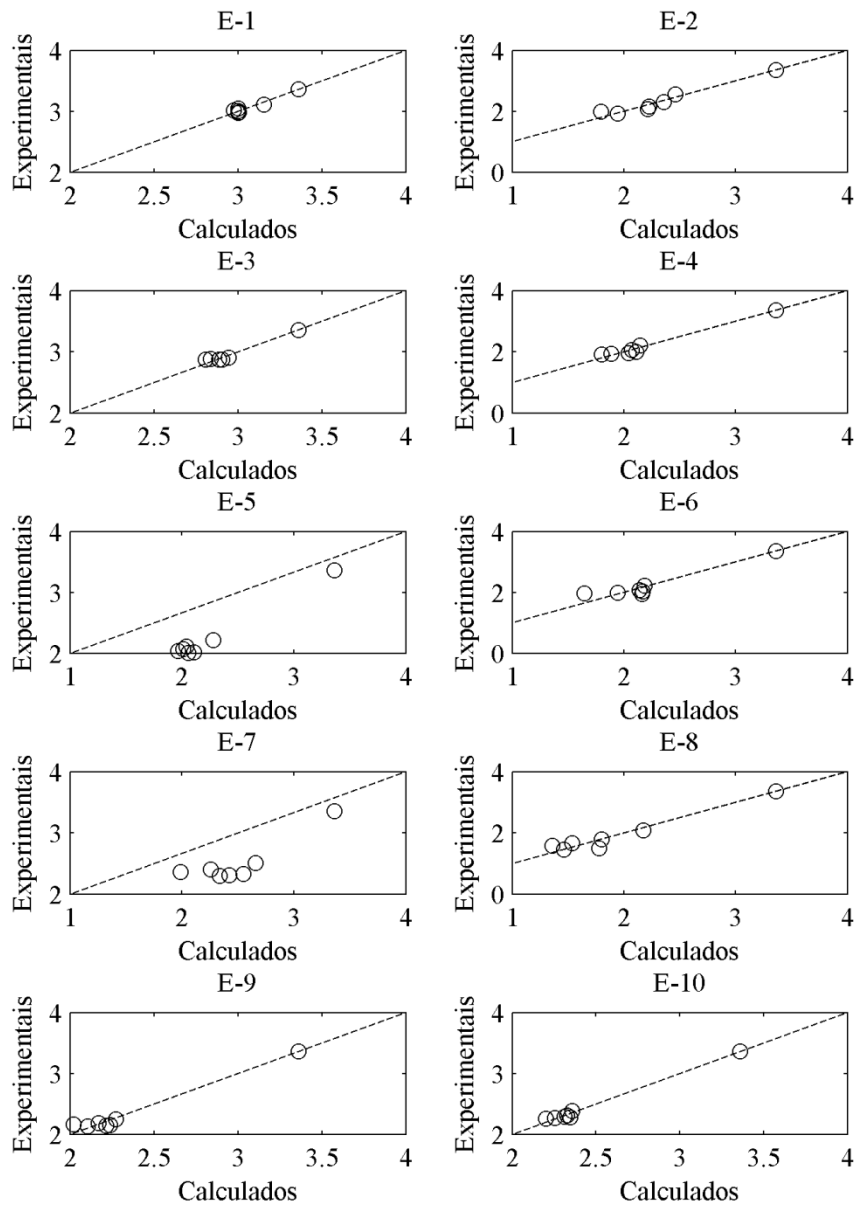


Figura 4.12. Valores experimentais e calculados com o modelo de Peleg para cada ensaio experimental (E) de desidração osmótica assistida com ultrassom.

Como alternativa à modelagem das cinéticas de desidração empregando modelos empíricos ou semi-empíricos, no presente trabalho foi utilizado o método “stepwise

regression” ou “passo a passo” para desenvolver um modelo que descreva de forma geral o comportamento da umidade em função do tempo de desidratação, concentração de cloreto de sódio e potência de ultrassom. Para o desenvolvimento do modelo ou modelos de previsão, foram usados todos os dados das variáveis mostradas na Tabela 4.5 (concentração de cloreto de sódio (x , kg NaCl·kg solução⁻¹), potência de ultrassom (P , W) e tempo (s) sobre a resposta conteúdo de umidade (U , kg·kg⁻¹, b.s.) e analisados pelo método passo a passo. Na modelagem, fatores de primeira, segunda, terceira e quarta ordem e a combinação destes foram utilizados, mostrando 9 correlações com o melhor desempenho para a resposta. A Tabela 4.7 mostra o modelo resultante e a validação estatística correspondente.

Tabela 4.7. Resultados da modelagem do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom pelo método “stepwise regression” ou passo a passo.

Parâmetro selecionado	Coefficiente do parâmetro	p (< 0.05)	R^2_{adj}	MRE (%)
Coef. linear	-0,532	NaN		
X	141,03	$8,087 \times 10^{-11}$		
T	$-7,388 \times 10^{-4}$	$2,839 \times 10^{-11}$		
x^2	-1630,4	$4,284 \times 10^{-11}$		
t^2	$2,066 \times 10^{-7}$	$6,711 \times 10^{-11}$		
x^3	7447,4	$8,284 \times 10^{-11}$	0,913	6,275
t^3	$-1,631 \times 10^{-11}$	$2,598 \times 10^{-11}$		
x^4	-11764	$3,217 \times 10^{-11}$		
x^2t	$-5,469 \times 10^{-3}$	$2,330 \times 10^{-3}$		
x^2t^2	$4,678 \times 10^{-7}$	$4,517 \times 10^{-2}$		

p : probabilidade do fator F no teste de significância ($\alpha=95\%$), x : concentração de cloreto de sódio (kg NaCl·kg solução⁻¹), t : tempo (s).

Valores de R^2_{adj} e MRE (%) foram utilizados para avaliar o desempenho da estimativa do método de regressão, obtendo-se um resultado satisfatório para serem consideradas todas as variáveis. Comparado com o modelo de Peleg, o método de regressão passo a passo pode ser mais preciso neste caso. Na Tabela 4.7, pode ser observado que os valores de significância são muito mais baixos do que 0,05. Portanto, o modelo (Eq. 4.4) obtido da análise também pode ser aceito.

$$U = -0,532 + 141,03x - 7,388 \times 10^{-4}t - 1630,4x^2 + 2,066 \times 10^{-7}t^2 + 7447,4x^3 - 1,631 \times 10^{-11}t^3 - 11764x^4 - 5,469 \times 10^{-3}x^2t + 4,678 \times 10^{-3}x^2t^2 \quad (4.4)$$

A Figura 4.7 mostra os dados experimentais e calculados, os resíduos dos valores observados e previstos e à distribuição de Gauss dos valores médios do modelo ajustado na resposta conteúdo de umidade. A análise da superfície usando o modelo ajustado para o conteúdo de umidade (Figura 4.8) mostrou uma relação entre os fatores concentração de

cloreto de sódio, potência de ultrassom e o tempo. Desta forma, o modelo descrito pelo método (Eq. 4.4) pode ser aplicado para quaisquer valores dentro da faixa dos parâmetros avaliados.

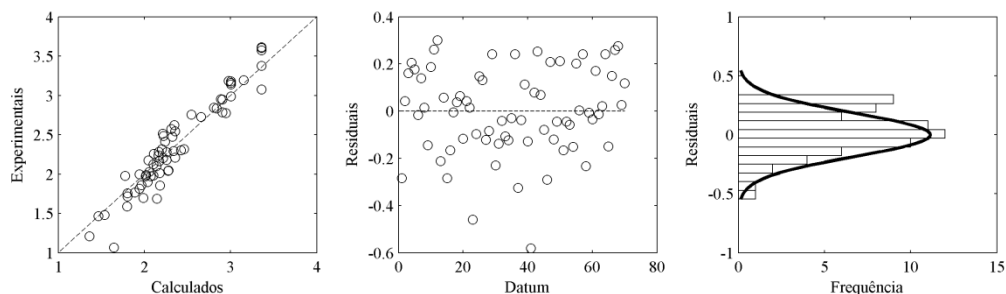


Figura 4.13. Análise dos residuais do modelo desenvolvido para a simulação do processo de desidratação osmótica assistida com ultrassom pelo método passo a passo.

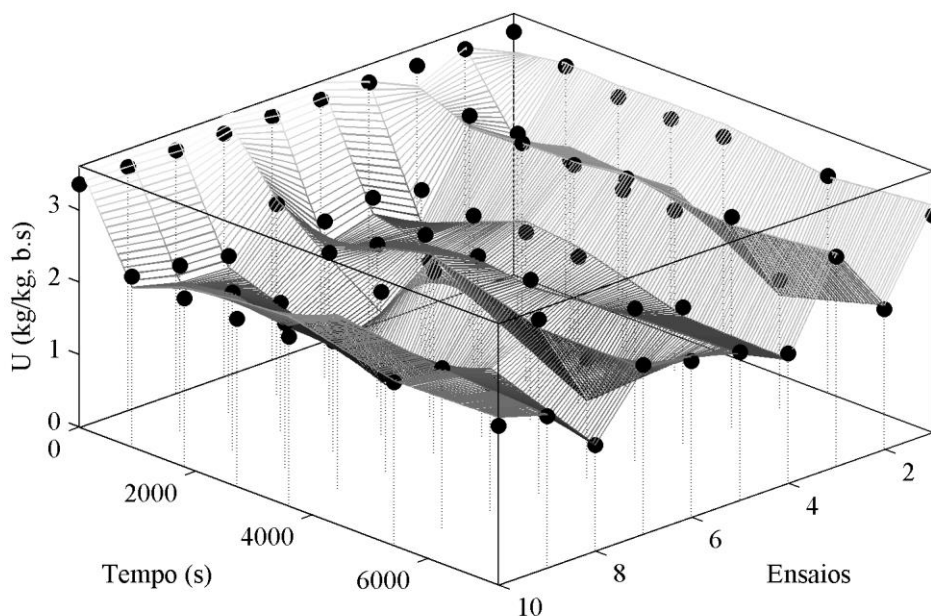


Figura 4.14. Valores experimentais (●) e calculados (□) do conteúdo de umidade através do método passo a passo.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliada a composição química do miolo da paleta bovina, onde foram obtidos valores similares aos já estabelecidos pela literatura. Nos resultados, pode-se observar pouca variabilidade nos valores obtidos.

Foram obtidos experimentalmente dados de densidade, calor específico, viscosidade dinâmica e condutividade térmica de soluções de cloreto de sódio para uma vasta faixa de concentração mássica e temperatura, sendo observada uma tendência linear com a concentração de cloreto de sódio através do método estatístico de análise de variância. Além disso, as propriedades testadas variaram com a temperatura de acordo com as equações ajustadas (linear para a condutividade térmica, exponencial para o calor específico, quadrática e logarítmica para a densidade e viscosidade dinâmica, respectivamente). O número adimensional de Prandtl foi avaliado a partir dos dados experimentais das propriedades: calor específico, viscosidade dinâmica e condutividade térmica, mostrando um aumento em seu valor quando a temperatura diminui e a concentração de sal aumenta. Esta tendência foi correlacionada através da equação proposta no estudo. A análise estatística dos resíduos mostrou baixos desvios entre os dados experimentais e calculados para cada propriedade. Todas as correlações propostas envolvendo simultaneamente a concentração de sal e temperatura apresentaram resultados estatísticos aceitáveis ($MRE < 10\%$). Os dados obtidos das propriedades físicas e térmicas de soluções de cloreto de sódio podem ser utilizados para aplicações industriais.

Foram determinadas experimentalmente, para o miolo de paleta bovina, as cinéticas de desidratação assistida com ultrassom em função da concentração de sal e potência de ultrassom. Todas as combinações foram realizadas através de um desenho experimental central composto. O modelo de Peleg foi proposto para avaliar a perda do conteúdo de umidade em função do tempo, nas diferentes condições de potência de ultrassom e concentração de cloreto de sódio.

A partir dos parâmetros obtidos através do modelo de Peleg, principalmente a umidade de equilíbrio, foi possível observar a influência do ultrassom do processo. Em ensaios realizados na mesma concentração de sal, o aumento da potência ultrassônica aplicada resultou em uma maior redução da umidade do produto.

Além da regressão não linear pelo modelo de Peleg, foi realizada uma regressão através do método passo a passo, pouco estudado na área de alimentos. Para este estudo, foi construída uma equação em função dos parâmetros: potência de ultrassom, concentração de sal e tempo, unificando-os em um modelo que prediz a resposta na faixa de valores estudados ($R^2_{adj} > 0,910$; $MRE < 0,650$).

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestão para futuros trabalhos, propõem-se a aplicação de mais técnicas que permitam caracterizar melhor a carne, tanto antes, como depois de passar pelo processo de desidratação osmótica.

Propõe-se também, a avaliação mais criteriosa do campo acústico no meio ou da potência real transmitida a este, que pode ser feita através de sensores, como hidrofones, ou pela medição da variação de temperatura em um intervalo de tempo (método calorimétrico). Métodos estes que necessitam de melhor desenvolvimento e adaptação.

A avaliação do campo acústico pode oferecer informações muito importantes para compreender como esta tecnologia, que vem sendo aplicada como alternativa a outras tecnologias que apresentam maiores riscos, ou são mais caras, assim como alternativa para melhorar processos já bastante estudados, difundidos e utilizados, age no processo, de forma a poder otimizar sua aplicação.

O desenvolvimento de um sistema de aplicação de ultrassom, equipado com instrumentos capazes de mensurar a ação do ultrassom no meio de forma precisa e mais automatizada possível seria de grande utilidade, fornecendo informações importantes para a pesquisa e indústria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne, 2013. Acesso em: 25 de Maio. Disponível em: <<http://www.abiec.com.br/>>.

AOAC. **Official methods of analysis international**. 16 ed. Gaithersburg: Association of Official Analytical Chemists International, 1997.

AOCS. **Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists Society**. 6th Champaign, 2009.

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 Physics Chemistry Reference Data**, Gaithersburg, v. 22, n. 6, p. 1441-1453, 1993.

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

AYMERICH, T.; PICOUET, P. A.; MONFORT, J. M. Decontamination technologies for meat products. **Meat Science**, Cowra, v. 78, n. 1–2, p. 114-129, 2008.

BABIKER, S. A.; KHIDER, I. A.; SHAFIE, S. A. Chemical composition and quality attributes of goat meat and lamb. **Meat Science**, Cowra, v. 28, p. 273-277, 1990.

BELLET, D.; SENGELIN, M.; THIRRIOT, C. Determination des proprietes thermophysiques de liquides non-newtoniens a l'aide d'une cellule a cylindres coaxiaux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Chicago, v. 18, p. 1177-1187, 1975.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, n. 8, p. 911-917, 1959.

BRENNAN, J.G. **Food Processing Handbook**. Weinheim: Wiley-VCH, 215 p., 2006.

BRUNEAU, M.; POTEL, C. **Materials and Acoustics Handbook**. New York: Wiley, 943 p. 2013.

CALLOW, E. H. Comparative studies of meat. II. The changes in the carcass during growth and fattening, and their relation to the chemical composition of the fatty and muscular tissues. **The Journal of Agricultural Science**, Areca, v. 38, n. 02, p. 174-199, 1948.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; TELIS, V. R. N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: a thermodynamic approach. **Food and Bioproducts processing**, Christchurch, p. 1-10, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2013.10.005>

CAPOTE, F. P.; DE CASTRO, D. L. **Analytical applications of ultrasound**. Salt Lake City: Elsevier Science, 2007.

CÁRCEL, J. A. **Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia**. 344 p Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2003.

CÁRCEL, J. A.; BENEDITO, J.; ROSSELLÓ, C.; MULET, A. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 78, p. 472-479, 2007.

CÁRCEL, J. A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; BENEDITO, J.; MULET, A.. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 110, n. 2, p. 200-207, 2012.

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

CEVIK, A. Unified formulation for web crippling strength of cold-formed steel sheeting using stepwise regresion. **Journal of Constructional Steel Research**, Guildford, v. 63, n. 10, p. 1305-1316, 2007.

CHABBOUH, M. et al. Studies on the Salting Step of Tunisian Kaddid Meat: Experimental Kinetics, Modeling and Quality. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 5, p. 1882-1895, 2012/07/01 2012.

CHEN, Y.; SHI, R.; SHU, S.; GAO, W. Ensemble and enhanced PM₁₀ concentration forecast model based on stepwise regression and wavelet analysis. **Atmospheric Environment**, Norwich, v. 74, p. 346-359, 2013.

CORZO, O.; BRACHO, N. Application of Peleg model to study mass transfer during osmotic dehydration of sardine sheets. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 4, p. 535-541, 2006.

DENG, Y.; ZHAO, Y. Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 85, p. 84–93, 2007.'

FAHY, F. **Foundations of Engineering Acoustics**. 1 ed. San Diego: Elsevier, 465 p. 2000.

FALADE, K. O.; IGBEKA, J. C. Osmotic Dehydration of Tropical Fruits and Vegetables. **Food Reviews International**, Madison, v. 23, n. 4, p. 373-405, 2007.

FAUSTMAN, C.; CASSENS, R. G. The biochemical basis for discoloration in fresh meat: a review. **Journal of Muscle Foods**, New York, v. 1, n. 3, p. 217-243, 1990.

FENG, H.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.; WEISS, J. **Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing**. Oxford: Springer, 2010.

FIDALEO, M.; MORESI, M.; CAMMAROTO, A.; LADRANGE, N.; NARDI, R. Soy sauce desalting by electrodialysis. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 110, p. 175-181, 2012.

FIGURA, L. O.; TEIXEIRA, A. A. **Food physics: physical properties - measurements and applications**. 1 ed. Gainesville: Springer, 2007. 1-554 p.

GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Macrosonics: phenomena, transducers and applications. **Revista de Acústica**, Madrid, v. 33, n. 3-4, p. 36-42, 2002.

GHAFOOR, K.; CHOI, Y. H.; JEON, J. Y.; JO, I. H. Optimization of ultrasound-assited extraction of phenolic compounds, antioxidanst, and anthocyanins from grape (*Vitis vinifera*) seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Davis, v. 57, p. 4988-4994, 2009.

GARCIA-NOGUERA, J.; OLIVEIRA, F. I. P.; GALLÃO, M. I.; WELLER, C. L.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. **Drying Technology**, Kowloon, v. 28, n. 2, p. 294–303, 2010.

GOODENOUGH, A. E.; HART, A. G.; STAFFORD, R. Regression with empirical variable selection: description of a new method and application to ecological datasets. **Plos One**, San Francisco, v. 7, n. 3, p. 1-10, 2012.

HEIKKOLA, E.; LAITINEN, M. Model-based optimization of ultrasonic transducers. **Ultrasonics Sonochemistry**, Coventry, v. 12, p. 53-57, 2005.

HUFF-LONERGAN, E. Chemistry and Biochemistry of Meat. In: TOLDRÁ, F. (Ed. 1). **Handbook of Meat Processing**. Ames: Blackwell Publishing, 2010. cap.1, p.5-24.

KESTIN, J.; KHALIFA, H. E.; CORREIA, R. J. Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 2-150 °C and the pressure range 0.1-35 MPa. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, Gaithersburg, v. 10, n. 1, p. 71-87, 1981.

KUTTRUF, H. **Ultrasonics: fundamentals and applications**. 1 ed. London: Elsevier,. 1-453 p. 1991.

LAMBERT, A. D.; SMITH, J. P.; DODDS, K. L. Shelf life extension and microbiological safety of fresh meat - a review. **Food Microbiology**, Illinois, v. 8, n. 4, p. 267-297, 1991.

LINGYU YU; GIURGIUTIU, V. Multi-mode Damage Detection Methods with Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Michigan, v. 20, n. 11, p. 1329-1341, 2009.

MARTIN, K.; RAMNARINE, K. Physics. In: HOSKINS, P.; MARTIN, K.; THRUSH, A. eds. **Diagnostic ultrasound: physics and equipment**. Cambridge: Cambridge University Press,. 1-276 p. 2010.

MASON, T. J. Large scale sonochemical processing: aspiration and actuality. **Ultrasonics Sonochemistry**, Coventry, v. 7, n. 4, p. 145-149, 2000.

MASON, T. J.; LORIMER, J. P. **Applied sonochemistry: the uses of power ultrasound in chemistry and processing**. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 303 pp., 2002.

McCLEMENTS, D. J. Ultrasonic characterization of food and drinks: principles, methods and applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Amherst, v. 37, n. 1, p. 1-46, 1997.

MILLS, A. F. Mass transfer. In: KREITH, F. ed. **The CRC handbook of thermal engineering**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. 1-1143 p.

MONTALBO-LOMBOY, M.; JOHNSON, L.; KHANAL, S. K.; VAN LEEUWEN, J. H.; GREWELL, D. Sonification of sugary-2 corn: a potential pretreatment to enhance sugar release. **Bioresource Technology**, Trivandrum, v. 101, p. 351-358, 2010.

MONTEBELLO, N. P.; ARAÚJO, W. M. C. Carne & Cia. Editora SENAC: São Paulo, 2006. 309 p.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; PEREIRA, G. Viscosities of ternary aqueous solutions with glucose and sodium chloride employed in osmotic dehydration operation. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 57, p. 173-177, 2003.

MOTHIBE, K. B.; ZHANG, M.; NSOR-ATINDANA, J.; WANG, Y-C. Use of ultrasound pretreatment in drying of fruits: drying rates, quality attributes, and shelf life extension. **Drying Technology**, Kowloon, v. 29, p. 1611-1621, 2011.

MULET, A.; BENEDITO, J.; BON, J.; SANJUÁN, N. Low intensity ultrasonics in food technology. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 5, n. 4, p. 285-297, 1999.

PADRE, G. R.; ARICETTI, J. A.; MOREIRA, F. B.; MIZUBUTI, I. Y.; PRADO, I. N.; VISENTAINER, J. V.; SOUZA, N. E.; MATSUSHITA, M. Fatty acid profile, and chemical composition of *Longissimus* muscle of bovine steers and bulls finished in pasture system. **Meat Science**, Cowra, v. 74, p. 242-248, 2006.

PARDI, M. C. **Ciência, Higiene e Tecnologia da Carne**. 2ª. Goiânia: Editora UFG, 2001.

PELEG, M. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988.

PENSEL, L. The future of red meat in human diets. **Nutrition Abstracts & Reviews**, v. 68, p. 1-4, 1998.

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

POVEY, J. W.; MASON, T. J. **Ultrasound in Food Processing**. Oxford: Springer, 1998.

PITZER, K. S.; PEIPER, J. C.; BUSEY, R. H. Thermodynamic properties of aqueous sodium chloride solutions. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, Gaithersburg, v. 13, n. 1, p. 1-102, 1984.

POLIZELLI, M. A.; MANEGALLI, F. C.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Friction losses in valves and fittings for power-law fluids. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 4, p. 455-463, 2003.

RAMIRES, M. L. V.; NIETO DE CASTRO, C. A. Thermal conductivity of aqueous sodium chloride solutions. **Journal of Chemical Engineering Data**, Notre Dame, v. 39, p. 186-190, 1994.

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

RASTOGI, N. K. et al. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science & Technology**, Norwich, v. 13, n. 2, p. 48-59, 2002.

ROGERS, P. S. Z.; PITZER, K. S. Volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, Gaithersburg, v. 11, n. 1, p. 15-81, 1982.

SEDDON, K. R.; STARK, A.; TORRES, M. J. Influence of chloride, water, and organic solvents on the physical properties of ionic liquids. **Pure and Applied Chemistry**, North Caroline, v. 72, n. 12, p. 2275-2287, 2000.

SHARQAWY, M. H.; LIENHARD, J. H. V.; ZUBAIR, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. **Desalination and Water Treatment**, Oxford, v. 16, p. 354-380, 2010.

SIMAL, S.; BENEDITOH, J.; SANCHEZ, E. S.; ROSSEM, C. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 36, p. 323–336, 1998.

SIRÓ, I.; VÉN, Cs.; BALLA, Cs.; JÓNAS, G.; ZEKE, I.; FRIEDRICH, L. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 91, n. 2, p. 353-362, 2009.

TAYLOR, S. **Advances in Food and Nutrition Research**. London: CRC Academic Press, 2004.

TELIS-ROMERO, J.; GABAS, A. L.; POLIZELLI, M. A.; TELIS, V. R. N. Temperature and water content influence on thermophysical properties of coffee extract. **International Journal of Food Properties**, Muscat, v. 3, n. 3, p. 375-384, 2000.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F. Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 38, p. 27-40, 1998.

TONON, R. V.; BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 82, n. 4, p. 509-517, 2007.

TORNBERG, E. Engineering processes in meat products and how they influence their biophysical properties. **Meat Science**, Cowra, v. 95, n. 4, p. 871-878, 2013.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International**, Campinas, v. 26, n. 1, p. 59-68, 1993.

VILLAMONTE, G.; SIMONIN, H.; DURANTON, F.; CHÉRET, R.; DE LAMBALLERIE, M. Funtionality of pork meat proteins: impact of sodium chloride and phosphates under high-pressure processing. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Berlin, v. 18, p. 15-23, 2013.

WELTI-CHANES, J.; VERGARA-BALDERAS, F.; BERMÚDEZ-AGUIRRE, D. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 67, n. 1–2, p. 113-128, 2005.

WU, T. et al. Efficient Reduction of Chitosan Molecular Weight by High-Intensity Ultrasound: Underlying Mechanism and Effect of Process Parameters. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Davis, v. 56, n. 13, p. 5112-5119, 2008.