



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

Bruna Grassetti Fonseca

Produção de *bacon* assistida por ultrassom: caracterização da barriga
suína, cinética de salga úmida e propriedades de sorção do produto acabado

São José do Rio Preto
2023

Bruna Grassetti Fonseca

Produção de *bacon* assistida por ultrassom: caracterização da barriga suína, cinética de salga úmida e propriedades de sorção do produto acabado

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência 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. Área de concentração: Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Andrea Carla da Silva Barretto
Coorientador: Prof. Dr. Tiago Carregari Polachini

São José do Rio Preto
2023

F676p

Fonseca, Bruna Grassetti

Produção de bacon assistida por ultrassom : caracterização da barriga suína, cinética de salga úmida e propriedades de sorção do produto acabado / Bruna Grassetti Fonseca. -- São José do Rio Preto, 2023

130 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Javier Telis-Romero

1. Barriga suína. 2. Salga úmida. 3. Transferência de massa. 4. Ultrassom de potência. I. Título.

Bruna Grassetti Fonseca

Produção de *bacon* assistida por ultrassom: caracterização da barriga suína, cinética de salga úmida e propriedades de sorção do produto acabado

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência 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. Área de concentração: Engenharia de Alimentos.

Comissão Examinadora

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

Prof. Dr. Rodrigo Corrêa Basso
UNIFAL – Campus Poços de Caldas

Prof^ª. Dr^ª. Jéssica Thaís do Prado Silva
USP – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA)

Prof^ª. Dr^ª. Patrícia de Carvalho Damy Benedetti
União das Faculdades dos Grandes Lagos - UNILAGO

Prof. Dr. Wellington Mamoro Umeda
SEBRAE – São José do Rio Preto

São José do Rio Preto
03 de fevereiro 2023

Dedico este trabalho ao meu companheiro da vida, Fabiano, por estar ao meu lado na realização dos meus sonhos; aos meus pais, Edenir e Lourival, por todo amor e incentivo; à minha irmã, Bárbara, pelo carinho, parceria e força.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que acima de tudo, orienta, fortalece e sustenta nossas vidas;

Ao meu orientador, Javier, pelos ensinamentos, paciência, apoio, confiança, e auxílio incondicional na condução deste trabalho;

Aos meus coorientadores, Andrea e Tiago, pelo apoio na execução deste trabalho.

Ao meu esposo, Fabiano, por sempre acreditar em meu desenvolvimento profissional, pelo amor, paciência, compreensão e, por ser o alicerce diante dos desafios;

Aos meus pais, Edenir e Lourival, por serem os maiores incentivadores dos meus sonhos, sempre, gratidão por tudo que fizeram e fazem por mim com todo amor;

À minha irmã, Bárbara, por ser a maior torcedora das minhas realizações, pelo apoio e compreensão;

Aos demais familiares pelo carinho e apoio;

Aos meus colegas de laboratório, especialmente Márcio Augusto Ribeiro Sanches, pela amizade e por me ajudar em muitos momentos da execução deste trabalho;

A União das Faculdades dos Grandes Lagos (Unilago) e Centro Universitário de Rio Preto (UNiRP) pelo auxílio e compreensão durante esta etapa;

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos do IBILCE-Unesp e a todos os seus docentes, funcionários e discentes que me ajudaram direta ou indiretamente;

Obrigado a todos que me ajudaram de forma direta e indireta para que este trabalho fosse realizado, por me fazerem crescer como pessoa e como profissional.

RESUMO

O bacon é um dos derivados cárneos processados mais consumidos mundialmente, utilizado como ingrediente em diversas receitas e formulações alimentícias. Embora haja um crescente consumo de carne suína e do próprio bacon, o processamento da barriga suína em bacon é um gargalo principalmente devido aos longos tempos associados às etapas de salga. Nesse sentido, o ultrassom de alta intensidade (US) surge como uma tecnologia capaz de reduzir o tempo de processamento através da intensificação da transferência de massa em comparação com os métodos convencionais de agitação. Entretanto, tais efeitos são dependentes do material e de suas propriedades físicas. Nesse sentido, a presente tese buscou, inicialmente, avaliar as propriedades físicas de amostras de barriga suína em função do teor de umidade e da concentração NaCl. As barrigas suínas foram submetidas ao processo de salga úmida em soluções de NaCl na presença US e agitação mecânica convencional (AG). Amostras comerciais de bacon com diferentes teores de NaCl tiveram suas propriedades de sorção de água determinadas em diferentes temperaturas. Como resultado, obteve-se que a espessura e volume da barriga suína diminuíram com o aumento da concentração de sal nas amostras, enquanto que a área superficial para troca se manteve constante. Modelos lineares foram utilizados para representar estas propriedades em função das variáveis significativas. Ao analisar o processo de salga úmida, observou-se que o emprego de US ou AG intensificou as taxas de perda de água, ganho de sólido e conteúdo de NaCl nas amostras de barriga suína comparado a salga úmida estática. Ao comparar os dois métodos de aplicação, o US foi mais eficiente. A cinética do processo foi bem representada pelo modelo de Peleg, com boa precisão de ajuste aos dados experimentais de desidratação osmótica. No produto acabado (bacon comercial), as isotermas do tipo III foram afetadas pelo teor de NaCl e temperatura de armazenamento. Através do ajuste ao modelo de GAB, evidenciou-se uma redução na umidade de equilíbrio e umidade de monocamada na medida em que a temperatura do meio aumentou e o conteúdo de NaCl das amostras diminuiu. Com as informações obtidas, verificou-se que é possível intensificar os processos de salga pelo uso de US e projetar as condições de armazenamento de diferentes amostras de bacon de maneira mais eficiente pelo emprego das isotermas de sorção.

Palavras-chave: Barriga suína. Espessura. Salga úmida. Transferência de massa. Tecnologias emergentes.

ABSTRACT

Bacon is one of the most consumed processed meat products worldwide, being used as an ingredient in several recipes and food formulations. Although there is a growing consumption of pork meat and bacon itself, the processing of pork belly into bacon is a challenge mainly due to the long times associated with the salting step. In this sense, high-intensity ultrasound (US) appears as a technology that is able of reducing processing times by intensifying mass transfer compared to conventional agitation methods. However, such effects are dependent on the material and its physical properties. In this sense, this thesis initially aimed at evaluating the physical properties of pork belly samples as a function of moisture content and NaCl concentration. Pork bellies were subjected to wet salting in NaCl solutions in the presence of US and conventional mechanical agitation (AG). Commercial samples of bacon with different NaCl contents had their water sorption properties determined at different temperatures. As a result, it was found that the thickness and volume of the pork belly decreased with increasing salt concentration in the samples, while the surface area available for exchange remained constant. Linear models were used to represent these properties as functions of the significant variables. When analyzing the wet salting process, it was observed that the use of US or AG intensified the rates of water loss, solid gain and NaCl content in pork belly samples compared to static wet salting. When comparing the two applied methods, US was the more efficient. The process kinetics was well represented by the Peleg model, with good fitting accuracy to the experimental osmotic dehydration data. In the final product (commercial bacon), the type III isotherms showed to be affected by the NaCl content and storage temperature. By using the GAB model, a reduction in equilibrium moisture and monolayer moisture content was observed as the temperature of the medium increased and the NaCl content of the samples decreased. With the obtained information, it was verified that it is possible to intensify the salting processes by using US and to design the storage conditions of different bacon samples in a more efficient way by the use of sorption isotherms.

Keywords: Pork belly. Thickness. Wet salting. Mass transfer. Emerging technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Organização da apresentação dos resultados originados da presente tese de doutorado.....	19
Figura 4.1	Salga seca da carne.....	24
Figura 4.2	Produtos cárneos em salmoura.	25
Figura 4.3	Processo de salga por injeção.	26
Figura 4.4	Difusão de sal e água em regime transiente em uma manta de carne considerada como uma placa plana infinita.....	42
Figura 4.5	Esquema de um processo de equilíbrio molecular entre o alimento e o ambiente.....	45
Figura 4.6	Mapa de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água.....	47
Figura 4.7	Tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals.....	48
Figura 4.8	Isoterma de sorção de água de um alimento hipotético do tipo II.....	50
Figura 4.9	Tendência das alterações na atividade de água de um alimento submetido a diferentes temperaturas.....	52
Figura 5.1	Formato aproximado das amostras de barriga suína.....	68
Figura 5.2	Aparelho experimental utilizado para determinação do volume das amostras.....	70
Figura 6.1	Aparato experimenta: a) salmoura estática (SB); b) agitada mecanicamente (AG); c) assistida por ultrassom (US).....	83
Figura 6.2	Efeito da temperatura sobre a perda de água (WL) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US).....	88
Figura 6.3	Efeito da temperatura sobre o ganho de sólidos (SG) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US).....	90
Figura 6.4	Efeito da temperatura sobre o conteúdo de sal durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US).....	91
Figura 6.5	Efeito da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre a perda de água (WL) em diferentes.....	93

Figura 6.6	Efeito da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre o ganho de sólidos (SG) em diferentes temperaturas de processo.....	93
Figura 6.7	Efeito da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre o conteúdo de sal (SC) em diferentes temperaturas de processo.....	94
Figura 7.1	Efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção de água de cinco amostras de bacon comerciais, ajustadas pelo modelo de GAB.....	118
Figura 7.2	Isotermas de sorção de água das amostras T3 e T4 de bacon em diferentes temperaturas.....	120
Figura 7.3	Isotermas de sorção de água das amostras T3 e T5 de bacon em diferentes temperaturas.....	121
Figura 7.4	Isotermas de sorção de água das amostras T2 e T4 de bacon em diferentes temperaturas.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Efeitos do uso do ultrassom sobre alguns parâmetros físico-químicos de carne e produtos cárneos.....	28
Tabela 4.2	Características de sorção de água de carnes e produtos cárneos....	51
Tabela 4.3	Modelos mais utilizados para ajustar as isotermas de sorção de água dos alimentos.....	54
Tabela 5.1	Medidas de massa e área de uma folha de papel sulfite.....	71
Tabela 5.2	Composição química da barriga suína.....	73
Tabela 5.3	Umidade e teor de NaCl, volume, área e espessura da barriga suína em diferentes tempos de secagem para cada processo de salga.....	73
Tabela 5.4	Umidade e teor de NaCl, volume, área e espessura da barriga suína em diferentes tempos de secagem para cada processo de salga (continuação).....	74
Tabela 5.5	Parâmetros do ajuste da Equação (5) aos dados de volume, área e espessura das amostras de barriga suína em função da umidade e teor de NaCl.....	76
Tabela 6.1	Parâmetros do modelo de Peleg para Perda de água (WL).....	96
Tabela 6.2	Parâmetros do modelo de Peleg para o ganho de sólidos (SG).....	97
Tabela 6.3	Parâmetros do modelo de Peleg para o conteúdo de sal (SC).....	98
Tabela 6.4	Parâmetros do modelo Weibull para Perda de água (WL).....	104
Tabela 6.5	Parâmetros do modelo Zugarramurdi & Lupín para Perda de água (WL).....	105
Tabela 6.6	Parâmetros do modelo Weibull para Ganho de sólidos (SG).....	106
Tabela 6.7	Parâmetros do modelo Zugarramurdi & Lupín para o Ganho de sólidos (SG).....	107
Tabela 6.8	Parâmetros do modelo Weibull para o Conteúdo de sal (SC).....	108
Tabela 6.9	Parâmetros do modelo Zugarramurdi & Lupín para o Conteúdo de sal (SC).....	109
Tabela 7.1	Modelos usados para ajustar as isotermas de sorção de água do bacon.....	115
Tabela 7.2	Composição química das cinco diferentes amostras de bacon.....	116

Tabela 7.3	Parâmetros de ajuste do modelo GAB para todas as amostras de bacon nas diferentes temperaturas.....	124
------------	---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

a*	Valor Instrumental para Cor Vermelha na Carne
AG	Agitação Mecânica
ANOVA	Análise de Variância
AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
Aw	Atividade de Água
CRA	Capacidade de Retenção de Água
KHz	Quilo-hertz
L*	Valor Instrumental para Clareza de Cor na Carne
LD	<i>Longissimus Dorsi</i>
NaCl	Cloreto de Sódio
NaN₂	Nitrito de Sódio
OMS	Organização Mundial da Saúde
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio
RQEM	Raiz Quadrada do Erro Médio
SB	Salmoura Estática
SC	Conteúdo de Sal
SG	Ganho de Sólidos
URE	Umidade Relativa de Equilíbrio
US	Ultrassom
WL	Perda de Água
Xeq	Umidade de Equilíbrio
XG	Condição de Equilíbrio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	ORGANIZAÇÃO DA TESE	18
4	CAPÍTULO I - Revisão Bibliográfica	20
4.1	Produção e consumo de carne suína	20
4.2	Aspectos da produção e qualidade do bacon	20
4.3	Salga e cura da carne	21
4.3.1	Métodos de salga (ou cura de carne)	23
4.3.1.1	Salga seca (ou cura seca)	23
4.3.1.2	Salga úmida ou cura em salmoura	24
4.3.1.3	Salga/cura por injeção	25
4.4	Ultrassom como tecnologia emergente para intensificação dos processos de transferência de massa em produtos cárneos	26
4.4.1	Capacidade de retenção de água (CRA)	29
4.4.2	Cor	30
4.4.3	Textura	32
4.4.4	Características sensoriais	33
4.5	Modelagem matemática de perda de água (WL) e ganho de sólidos (GS) no processo de salga úmida e seca	34
4.5.1	Modelo de Peleg	35
4.5.2	Modelo Exponencial de Weibull	36
4.5.3	Modelo Exponencial	37
4.5.4	Modelo de Azuara	38
4.5.5	Relação entre os modelos de Peleg e Azuara	40
4.5.6	Modelo de Difusão	41
4.6	Isotermas de sorção	44
4.6.1	Efeito da temperatura nas isotermas de sorção	52
4.6.2	Efeito da composição química nas isotermas de sorção	52
4.6.3	Modelagem matemática das isotermas de sorção	53
4.7	REFERÊNCIAS	55

5	CAPÍTULO II - “Efeito da umidade e concentração de NaCl nas propriedades físicas de barriga suína no processo de produção de bacon”	64
6	CAPÍTULO III - “Estudo comparativo do efeito da agitação mecânica e aplicação de ultrassom na difusão de sal durante a salga de barriga suína”	78
7	CAPÍTULO IV - “Efeito da temperatura e da composição química nas propriedades de sorção de água de bacon”	110
8	CONCLUSÕES GERAIS	129

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado um dos principais produtores de proteína bovina, suína e avícola do mundo que produz, além de carne fresca e congelada, diversos outros produtos cárneos fermentados, curados, secos e/ou cozidos. Além do crescimento já evidenciado na produção e o consumo de proteínas de origem animal nos últimos anos, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019) projeta maior crescimento nos próximos dez anos, com liderança na exportação de carne de origem suína. Por essa razão, existe uma demanda para estratégias de diferenciação de produtos derivados de suínos.

Enquanto o consumo de carne suína pelo mercado externo se dá principalmente por meio da comercialização de carcaças inteiras ou cortes específicos *in natura*, 70% do consumo de carne suína pelo mercado interno ocorre através de produtos processados, e.g. embutidos e defumados, frente a 30% na forma de cortes *in natura*. Isso acontece devido às estratégias de agregação de valor aos cortes oriundos do processo de espostejamento. Com isso, produtos como o salame, copa e presunto acabam apresentando muitas vezes um valor agregado maior do que cortes mais nobres. Além da questão de agregação de valor, as técnicas de processamento contribuem para diferentes experiências sensoriais além da própria conservação dos cortes.

Embora diversas tecnologias sejam utilizadas para o processamento e conservação de produtos cárneos, o processo de salga ainda continua sendo um dos métodos mais aplicados para estender o *shelf-life* deste tipo de produto em comparação com a carne *in natura*. A estabilidade de produtos cárneos salgados é fator ainda mais relevante para regiões cuja cadeia de frio é escassa e/ou inexistente. Nesse sentido, a salga é um das principais técnicas para produção de um dos produtos cárneos salgados e curados mais consumidos mundialmente: o bacon.

O bacon é considerado um produto cárneo, originário do abate suíno, que apresenta propriedades sensoriais diferenciadas resultado dos processos de salga, cura e defumação. Ele é considerado um ingrediente versátil na culinária brasileira e mundial nas mais diferentes preparações e refeições. Sua qualidade física, química, microbiológica e sensorial resulta de uma combinação de diversos fatores, desde a qualidade da matéria-prima até o processo e armazenamento. Por essa razão, ainda que se obtenha uma matéria-prima de ótima qualidade, o produto final não apresentará o mesmo padrão se as condições de processo e estocagem não forem bem estudadas ou se os mecanismos envolvidos não forem bem compreendidos.

A salga é um processo já consolidado, mas ainda apresenta restrições quanto ao tempo de processamento elevado. Por esta razão, tecnologias não-convencionais vêm surgindo com o objetivo de promover e/ou acelerar as reações já existem para desenvolvimento de propriedades tecnológicas. Tecnologias emergentes de processamento como o ultrassom vêm sendo cada vez mais inseridas para acelerar e intensificar diferentes processos de transferência de massa. Sua utilização abre novos caminhos para o processamento de alimentos devido à economia de energia de processo, aumento de rendimento e/ou qualidade do produto final.

As ondas ultrassônicas de alta intensidade emitidas pelo transdutor são capazes de gerar o fenômeno de cavitação, dentre outros mecanismos, favorecendo os processos de transferência de massa na interface sólido-líquido. Nesse contexto, a aplicação de ultrassons representa uma potencial tecnologia coadjuvante e inovadora para o processamento de produtos cárneos – como o bacon – com a possibilidade de reduzir o tempo de salga e eventuais efeitos negativos do processamento convencional. Entretanto, a quantificação de tal contribuição e forma de atuação dos mecanismos no caso específico do bacon ainda necessita ser elucidada na literatura.

Ainda que o bacon seja submetido aos processos de salga e cura, ele ainda necessita ser armazenado em condições adequadas para evitar reações indesejáveis de deterioração. Dentre essas condições, encontram-se, principalmente, os processos de oxidação lipídica e desenvolvimento microbiológico. Estas reações são minimizadas quando o produto é armazenado em condições controladas de estocagem, diferentemente do que é muitas vezes encontrado comercialmente. Sendo assim, independentemente dos processos de produção, a forma como a atividade de água do bacon é influenciada por condições de estocagem é fator fundamental para garantir a qualidade final do produto.

Dessa forma, este trabalho buscou avaliar diferentes etapas do processamento do bacon: transferência de massa durante a salga e propriedades de sorção de água no armazenamento. A primeira etapa já é bastante estudada, porém a adição de tecnologias assistentes e inovadoras como o ultrassom requer uma avaliação mais aprofundada do processo. Por outro lado, o armazenamento do produto final é uma etapa convencional que é, muitas vezes, desprezada em produtos curados. A escassez e negligência de seu estudo também foi matéria de estudo na presente tese.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar os efeitos da aplicação de ultrassom de alta intensidade na salga úmida como pré-tratamento ao processamento de bacon e as propriedades de sorção de água durante o armazenamento em condições controladas.

2.2. Objetivos específicos

- i. Determinar as propriedades físicas (volume, área superficial e espessura) de amostras de barriga suína utilizada na produção de bacon em função da umidade e concentração de NaCl;
- ii. Avaliar a influência da aplicação de ultrassom de alta intensidade quanto à cinética de ganho de NaCl e perda de água em amostras de barriga suína durante a salga úmida para produção de bacon;
- iii. Avaliar a influência da aplicação de ultrassom de alta intensidade sobre os coeficientes de transferência de massa de NaCl e água em amostras de barriga suína durante a salga úmida para produção de bacon;
- iv. Determinar as propriedades de sorção de água em diferentes temperaturas de amostras comerciais de bacon com diferentes concentrações de NaCl;

3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese encontra-se organizada em quatro capítulos para desenvolvimento da proposta, objetivos e os resultados obtidos dos assuntos abordados. A Figura 3.1 ilustra a organização dos resultados originados desta tese de doutorado.

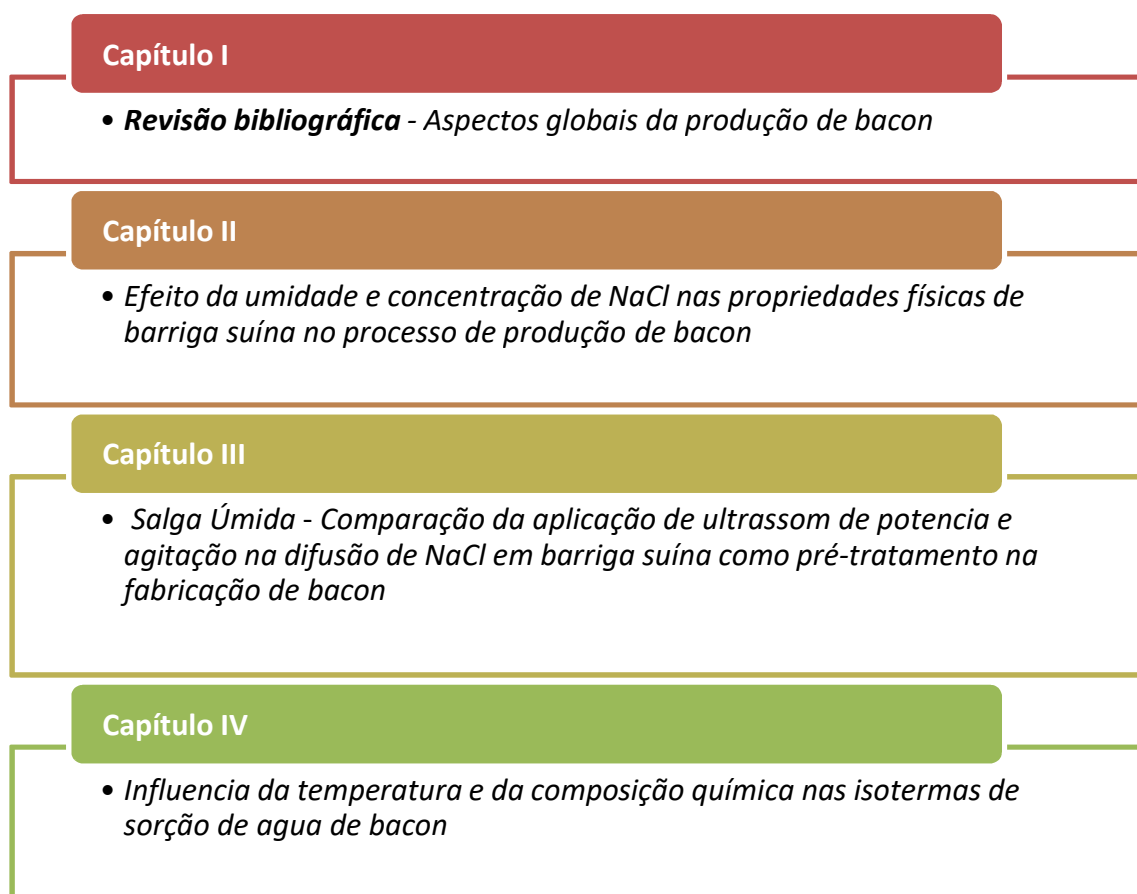
O Capítulo I inicial consiste em uma revisão bibliográfica sobre o tema abordado na tese. A revisão trata do mercado de consumo e processos mais utilizados para produção de bacon, desde a matéria-prima até o processo de armazenamento.

O Capítulo II aborda aspectos fundamentais da proposta da tese, principalmente no que diz respeito às propriedades físicas de barriga suína utilizadas para produção do bacon. Neste capítulo, foi reportada a influência da umidade e concentração de NaCl nas propriedades físicas, principalmente sobre a área superficial para transferência de massa e espessura. Os resultados foram publicados no formato de capítulo do livro intitulado “*Nutrição, Análise e Controle de Qualidade de Alimentos 2*”.

Uma vez caracterizada a barriga suína em diferentes condições de processo, o Capítulo III aborda a aplicação do ultrassom de alta intensidade para intensificar a difusão de NaCl em amostras de barriga suína e a consequente perda de água destas amostras para a solução osmótica. O emprego e avaliação de modelos matemáticos que quantificam a perda de água e o ganho de NaCl durante a salga úmida de amostras de barriga suína também está apresentado, visto que as soluções teóricas não se ajustam à transferência de massa em materiais heterogêneos como a própria barriga suína.

O Capítulo IV desta tese, de título “*Influencia da temperatura e da composição química nas isotermas de sorção de água de bacon*”, buscou avaliar como as propriedades de sorção de água em amostras de bacon são afetadas pelas condições de armazenamento. Para isso, procedeu-se com a modelagem matemática das isotermas de sorção de seis marcas comerciais de bacon contendo diferentes concentrações de NaCl. Uma faixa de temperatura entre 5 e 40 °C foi utilizada para simulação de diferentes ambientes de estocagem do produto acabado.

Figura 3.1 – Organização da apresentação dos resultados originados da presente tese de doutorado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 CAPÍTULO I - Revisão Bibliográfica: Aspectos globais da produção de bacon

4.1. Produção e consumo de carne suína

Embora a carne suína não seja a carne mais consumida no Brasil, estando atrás da carne de frango e bovina, ela é o tipo de carne mais consumida mundialmente (USDA, 2022). O receio em consumi-la por achá-la uma carne com alto teor de gordura pode ser um dos motivos do seu baixo consumo no Brasil (SWATLAND, 2010).

Por outro lado, no segundo semestre de 2021, o consumo de carne suína no Brasil chegou a quase 18 kg, ou seja, 1 kg per capita a mais em relação ao mesmo período de 2020. Dentre um total de aproximadamente 93 kg per capita de todas as carnes disponíveis para consumo, a carne suína representa cerca de 20% deste total (ABPA, 2020).

Esse aumento pode ser atribuído à maior produtividade das granjas e pelo fato de alguns cortes da carne suína serem considerados opções mais saudáveis. Seguindo a mesma tendência do consumo per capita, no primeiro semestre de 2021 houve um aumento de 16% na exportação quando comparado com mesmo período do ano anterior (ABCS, 2022).

4.2. Aspectos da produção e qualidade do bacon

O bacon, especificamente, é um produto originado a partir de carne suína que possui grande apreciação em todo o mundo. Os Estados Unidos e a China são os países com maior consumo. Isso se deve principalmente ao seu sabor marcante de defumado, sua cor e por ser ingrediente essencial em muitas receitas e formulações (USDA, 2022)

O processo de produção do bacon, em geral, se inicia pela seleção da matéria-prima. O corte mais comumente utilizado é a própria barriga suína. Retira-se o excesso de carne e, em alguns casos, o couro. Dessa forma, a peça fica com a gordura e uma camada de carne. Em seguida, a peça é submetida a um processo de salga que pode ser realizada tanto a seco, quanto por salmoura ou por injeção. Vale ressaltar que a salga consiste na adição de solutos, em geral cloreto de sódio, que auxiliam na preservação pela redução da atividade de água do produto. Uma vez que o produto esteja salgado, o corte pode ser massageado ou deixado em repouso para incorporação dos solutos. Essa etapa pode durar, em geral, até 12 horas (SARCINELLI; VENTURINI; SILVA, 2007). Em seguida, a barriga suína é levada à estufa cozimento e/ou câmaras de defumação, seguindo para lavagem, resfriamento e, por fim, envase à vácuo.

Uma das substâncias mais utilizadas no processo de produção do bacon é a incorporação de nitrito de sódio (NaNO_2). Ele contribui para a formação da cor rosa característica, inibe o crescimento de alguns microrganismos patogênicos, reduz a oxidação lipídica e produz o sabor de defumado. No entanto, apesar dessas vantagens, o nitrito de sódio pode representar alguns riscos (LEE et al., 2017). Por essa razão, o correto emprego da salga úmida com NaCl auxilia no risco de contaminação comparado à incorporação de NaNO_2 , se adequadamente realizado.

Os produtos cárneos defumados apresentam algumas vantagens como o sabor diferenciado e maior durabilidade (*shelf life*), pois inibe o crescimento microbiano e a oxidação da gordura (TOLDRÁ, 2017). Além disso, a defumação auxilia na diminuição da atividade de água, gerando substâncias fenólicas. Esses compostos são adsorvidos na superfície e/ou penetram no interior da carne, conferindo propriedades antimicrobianas e antioxidantes (SALDAÑA et al., 2018).

A defumação pode ser promovida, originalmente, pela queima incompleta de pedaços de madeira. Atualmente, tem-se utilizado muito a fumaça líquida – produto de alto valor agregado obtido pela concentração dos compostos da queima. Sua vantagem frente à queima convencional está em proporcionar uma cor mais uniforme ao produto e menores efeitos nocivos (PACHECO; YAMANAKA, 2006).

Sabe-se que a qualidade do produto final cárneo é fortemente dependente da qualidade da matéria prima adquirida. Geralmente, para o caso do bacon, é levado em consideração a quantidade e o tipo de corte e de gordura. As gorduras de boa qualidade tecnológica foram descritas como brancas e firmes, enquanto as gorduras de baixa qualidade foram definidas como macias, oleosas, úmidas, cinzentas e moles. Uma maior quantidade de gordura favorece o fatiamento, porém os consumidores tendem a preferir o bacon com maior quantidade de carne. Nesse sentido, um dos fatores nutricionais e sensoriais que mais influenciam na compra do bacon é a proporção carne/gordura (TOLDRÁ, 2000).

4.3. Salga e cura de carne

A salga e a cura de carne são expressões muito utilizadas em tecnologia de produtos cárneos. Os produtos cárneos curados surgiram como uma necessidade humana de se conservar a carne e evitar a deterioração e o desperdício. Atualmente, existe uma

variedade de produtos cárneos curados que dependem dos recursos de cada país (território e receita específica) (FRAQUEZA; PATARATA, 2019).

Entretanto, existe uma grande preocupação no consumo de produtos cárneos curados. Questões de saúde e segurança são umas dos principais aspectos a serem atentados, pois alguns riscos químicos e microbianos têm sido relacionados a produtos de carne curada. Alguns perigos químicos são associados ao seu conteúdo em compostos nitroso, associados ao uso de nitrato/nitrito. Além disso, os consumidores vêm exigindo, cada vez mais, produtos cárneos com baixo teor de sal, com baixo teor de gordura e sem aditivos químicos. A própria Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda realizar a salga para produção de alimentos reduzidos em teor de sal nos alimentos com a finalidade de prevenir doenças cardiovasculares (FRAQUEZA; BORGES; PATARATA, 2018).

A salga consiste principalmente na adição de sal comum, já a cura envolve a adição de nitrito e/ou nitrato juntamente com o sal. Geralmente, essa adição ocorre em pedaços pequenos de carne ou até mesmo triturada, sendo estabilizadas por fermentação, secagem, defumação ou tratamento térmico. O objetivo final é conseguir conservar o produto em temperatura ambiente (RIVERA; BUNNING; MARTIN, 2019).

Os sais adicionados no processo de cura criam na carne um meio bacteriologicamente seletivo para a flora desejada, o que contribui para uma cura de qualidade (conservação, estabilidade da cor, formação de aroma, etc). Durante o processo de cura, acontece a desidratação osmótica e a difusão, pois se reduz o valor da atividade de água (a_w) e, conseqüentemente, há um aumento da concentração de sólidos. Esse processo facilita o desenvolvimento das características organolépticas e sensoriais específicas dos produtos cárneos crus curados (IACUMIN et al., 2019).

O cloreto de sódio e os sais nitrificantes podem ser adicionados na carne de diferentes formas. A forma escolhida vai depender do produto final a ser obtido e dos recursos disponíveis. Atualmente, diversas tecnologias estão sendo estudadas com a finalidade de diminuir o teor de sal e de acelerar sua penetração em produtos curados. Dentre essas tecnologias convencionais, é possível citar o massageamento. Entretanto, tecnologias emergentes como o emprego de ultrassom de alta intensidade, o vácuo, centrifugação, entre outros, vem sendo mostrados como potenciais alternativas intensificadoras de processo (SANCHES et al., 2021).

O principal ingrediente da salga é o cloreto de sódio, pois é capaz de absorver umidade e, por isso, é muito eficiente para aumentar a durabilidade dos alimentos. Já a formação do sabor curado e particularmente da cor vermelha de cura, característica de diversos produtos cárneos curados, é identificada como dependente do uso de nitrato/nitrito com sal (ALBARRACÍN et al., 2011).

O procedimento consiste basicamente em retirar a água dos alimentos e, conseqüentemente, aumentar o tempo de validade. Ao adicionar sal, a proteína começa a expulsar o líquido e, quanto menos água, maior será a conservação do alimento. Além disso, o cloreto de sódio proporciona diferentes funcionalidades na qualidade final do produto cárneo: conservação devido ao efeito bacteriostático, inibição do crescimento de microrganismos indesejáveis a partir da alteração por pressão osmótica, contribuição para o sabor, desidratação e aumenta a solubilidade da proteína miofibrilar (SANCHES et al., 2021).

4.3.1. Métodos de salga (ou cura de carne)

A salga ou a cura de carne pode ocorrer de diversas maneiras, dentre elas podemos citar a salga seca, a salga úmida (em salmoura), por injeção ou por uma combinação de estes métodos. Vale destacar que independentemente do método de cura empregado, os sais se dissolvem na fase aquosa da carne e são transportadas ao interior do produto (TOLDRA, 2017).

4.3.1.1 Salga seca (ou cura seca)

O processo de salga à seco é um dos métodos mais antigos e de maior facilidade de aplicação (SANCHES et al., 2021). Ele visa aplicar o agente de cura diretamente na superfície da carne, assim como mostrado na Figura 4.1. O agente se dissolve parcialmente no fluido proveniente da superfície do produto cárneo como consequência dos mecanismos osmóticos e de difusão. Embora seja um processo mais lento, ele proporciona uma camada adicional de proteção ao produto durante a salga juntamente com o emprego de baixas temperaturas.

No presunto curado a seco, por exemplo, a perda de umidade, maturação e o sal impedem o desenvolvimento de qualquer microrganismo deteriorante ou patogênico (BARRETTO et al., 2018a). Dessa forma, para evitar o desenvolvimento de

microrganismos na etapa da salga é importante também controlar a temperatura e a umidade relativa da sala de salga.

O processo de salga seca é geralmente conduzido em recipientes de aço inox. Isto proporciona uma melhor manipulação, além de uma maior qualidade higiênico-sanitária em comparação com processos tradicionais (ALBARRACÍN et al., 2011).

Figura 4.1 - Salga seca da carne



Fonte: CHARCUTARIA, 2022.

4.3.1.2 Salga úmida ou cura em salmoura

O processo de salga úmida, ou em salmoura, surge como uma alternativa diferenciada para a difusão do sal na carne. Ele consiste na imersão dos cortes em uma solução salina (salmoura com eventuais agentes de cura) (Figura 4.2). Similarmente a salga seca, este processo também é lento e requer um tempo relativamente longo para difusão dos agentes osmóticos em todo o produto. Entretanto, o tempo de processamento ainda é mais curto devido à maior absorção de sal e a menor perda de água e, dessa forma, uma menor redução de peso (LEE et al., 2017).

Durante esta operação, ocorre a transferência de sal e de água da salmoura para a carne. Assim como na salga seca, na salga em salmoura é pertinente que ocorra em câmaras frigoríficas a 2-5°C para evitar problemas de crescimento microbiano (TOLDRÁ, 2017). No aspecto físico-químico e sensorial, a salga em salmoura favorece a entrada de sal na carne quando comparado com a salga seca. Assim, o fator principal que regula a velocidade de penetração do sal é a formação de uma salmoura saturada na superfície da carne.

Figura 4.2 - Produtos cárneos em salmoura



Fonte: CHARCUTARIA, 2014.

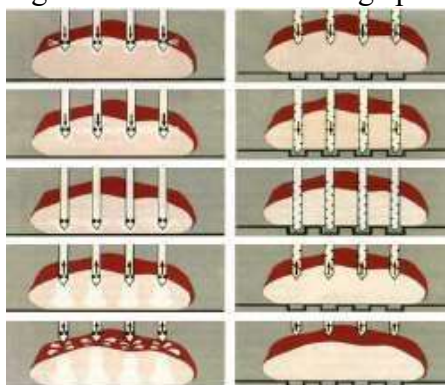
4.3.1.3 Salga ou cura por injeção

Este método se baseia na injeção da solução salina (salmoura) mediante a aplicação de agulhas dentro da peça de carne com a finalidade de conseguir uma dispersão do cloreto de sódio e dos sais nitrificantes em todo o produto. Essa técnica permite uma penetração acelerada e com distribuição uniforme, já que sua injeção pode ocorrer ao longo de todo o tecido cárneo (ALBARRACÍN et al., 2011). Quando a injeção é realizada artesanalmente, pode-se fazer uso de seringas. Em aplicações industriais, estes injetores já funcionando sob pressão para garantir um processo mais rápido e padronizado.

Em cortes nos quais o sistema vascular não foi alterado, é possível fazer a injeção da salmoura por vias arteriais. Este é o caso dos cortes de pernil e paleta. Quando isso não é possível, a injeção é feita por via intramuscular em diversos pontos do tecido cárneo. Com a finalidade de obter uma injeção mais homogênea, pode-se realizar a injeção múltipla através de uma série de microagulhas em múltiplos pontos da carne (Figura 4.3). Uma vez injetadas as soluções salinas, os agentes osmóticos penetram na carne por meio de ação osmótica (LEE et al., 2017).

Muitas vezes, são utilizados diferentes métodos de introdução dos sais de salga e cura através de processos combinados (GAULT, 1985). O pernil, por exemplo, pode ser curado por meio da injeção de salmoura via arterial, combinado com injeção intramuscular para ser submetido, finalmente, a uma salga seca ou salga úmida.

Figura 4.3 - Processo de salga por injeção.



Fonte: ROÇA, 2000.

Além dos métodos tradicionais para incorporação do soluto desejado na matriz cárnea, tecnologias emergentes vêm sendo estudadas com o objetivo de acelerar a transferência de massa e reduzir eventuais efeitos negativos relacionados ao longo tempo de exposição do produto à solução osmótica (CHEMAT; ASHOKKUMAR, 2017). Uma dessas tecnologias é o emprego do ultrassom de potência, ou alta intensidade, para promoção de efeitos soroquímicos que facilitam a entrada do soluto na carne e reduzem o tempo de processo.

Especificamente, Ozuna et al. (2013) ressaltam que o ultrassom de alta intensidade é uma ferramenta interessante para intensificar a etapa de salga úmida, como acontece na produção de bacon. Muitos estudos têm evidenciado que a aplicação do ultrassom na carne aumenta a taxa de ganho de cloreto de sódio em comparação com a carne submetida a salga estática (CÁRCEL et al., 2007, SIRÓ et al., 2009). O tratamento com ultrassom também não mostrou nenhum efeito negativo sobre o rendimento do produto, sobre os teores de umidade ou perfil de textura (MCDONNELL et al., 2014a; MCDONNELL et al., 2014b). Por tratar-se de uma tecnologia nova, o método ainda necessita de pesquisas envolvendo diferentes condições de processos, produtos e matérias-primas.

4.4. Ultrassom como tecnologias emergentes para intensificação dos processos de transferência de massa em produtos cárneos

As maneiras de desenvolver e processar alimentos estão cada vez mais direcionados nas necessidades do consumidor. A grande demanda por alimentos processados que tenham qualidade e segurança comprovadas está ampliando as tecnologias utilizadas na indústria de alimentos (CHEMAT; ASHOKKUMAR, 2017).

Entre essas tecnologias, alguns estudos destacam o uso de alta pressão, pulsos elétricos, microfiltração, micro-ondas e ultrassom (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011; LEADLE; WILLIANS, 2008, CHEMAT; ASHOKKUMAR, 2017). Tem como objetivo de melhorar algumas propriedades funcionais nos alimentos, reduzir o tempo do processamento e o uso de água e energia e, minimizar a produção de efluentes e substâncias tóxicas.

O ultrassom, especificamente, é uma onda mecânica acústica que necessita de um meio para se propagar. Em intensidades acima de 20 kHz, pode causar cavitação, fenômeno que ocorre quando a onda atravessa um meio líquido, produzindo pequenas bolhas e gerando energia. A energia pode acelerar reações químicas e/ou causar modificações na microestrutura do alimento. Essas ondas são classificadas como de alta (baixa frequência, 20-100 kHz; altas intensidades, 10-1000 W.cm⁻²), capazes de romper ligações intermoleculares principalmente pelo mecanismo de cavitação (CÁRCEL et al., 2007).

A cavitação ocorre quando a onda atravessa um meio líquido gerando zonas sucessivas de baixa e alta pressão que acabam superando as forças coesivas do líquido e formam bolhas de cavitação. Essas bolhas implodem, causando um aumento de pressão e temperatura localizada, além de uma série de microjatos que atuam principalmente na interface sólido-líquido dos alimentos (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011; CÁRCEL et al., 2012).

Em aplicações industriais e laboratoriais, o ultrassom é gerado a partir da energia elétrica fornecida a um transdutor, composto por um cristal piezoelétrico (BERLAN, 1992). O cristal piezoelétrico transforma a energia elétrica em ondas mecânicas de frequência específica (LEIGHTON, 1994). O transdutor é ligado a um aparato que transmite a vibração através do fluido, denominado sonda. A energia transferida para a solução acarreta a propagação das ondas mecânicas. Parte dessa energia é convertida em calor e, muitas vezes, um sistema de resfriamento é indicado (ALARCON-ROJO et al., 2019).

Ojha et al. (2016) verificaram que a cavitação provocada pelo ultrassom, conduzido no processo de salga úmida de carne suína, intensificou a transferência de massa no sistema. Ainda, os autores concluíram que o ultrassom auxiliou na difusão de sal na carne, reduzindo o tempo de processamento.

Por outro lado, Dolatowski e Stadnik (2007) e Stadnik e Dolatowski (2011) evidenciaram o potencial uso do ultrassom no processo de cura da carne com aumento na capacidade de retenção de água. Os autores sugerem, ainda, que tal tecnologia reduz o tempo de *rigor mortis* devido à alteração das fibras musculares.

Pelo potencial de alteração na estrutura do alimento, a utilização do ultrassom no processamento de carnes pode causar várias modificações na estrutura física e nas condições bioquímicas do produto (ZOU et al., 2018). A energia liberada pelo ultrassom pode destruir parcialmente as proteínas miofibrilares, deixando-as mais expostas facilitando sua ligação com a água. Também pode aumentar os espaços interfibrilares e reter maior quantidade de água e facilitar a entrada de solutos.

Com isso, há necessidade de ampliar as pesquisas dos efeitos do ultrassom sobre as propriedades das carnes e produtos cárneos contemplando maior variabilidade das condições de processamento e de produto finais (BARRETTO et al., 2022). Recentemente estudos têm reportado os efeitos da aplicação do ultrassom na carne e em processamento de produtos cárneos. A Tabela 4.1 sintetiza os principais efeitos do uso do ultrassom sobre os parâmetros físico-químicos, os quais serão discutidos nos próximos itens.

Tabela 4.1 - Efeitos do uso do ultrassom sobre alguns parâmetros físico-químicos de carne e produtos cárneos.

Produto	Condições	Efeito do ultrassom	Autor
Salame Italiano	500W.cm ⁻² ; 25kHz; 3, 6 e 9 min.	Sem modificações nos parâmetros de cor instrumental;	(ALVES et al., 2018).
Carne suína curada	4, 2, 11 e 19W.cm ⁻² ; 20kHz; 10, 25 e 40 min.	Sem modificações nos parâmetros de cor instrumental;	(MCDONNELL et al. 2014b).
Linguiça	200W.cm ⁻² ; 25 kHz; 10.5 min.	Sem modificações nos parâmetros de cor instrumental;	(CICHOSKI et al., 2015).
Presunto cozido	600W.cm ⁻² ; 25kHz; 10 min.	Aumento do valor de a* e redução do valor de L*; Modificações na microestrutura; Aumento da CRA.	(BARRETTO et al., 2018a)

Presunto cozido	10-20W.cm ⁻² ; 40 kHz; 2-15 min.	Sem modificações no valor de L* e redução no valor de a*.	(FERRENTINO; SPILIMBERGO 2016)
Carne seca fermentada	480W.cm ⁻² ; 40kHz; 10 min.	Sem modificações no valor de L* e redução no valor de a*.	(WÓJCIAK et al. 2019)
Presunto cru curado	-	Modificações na microestrutura; Aumento da CRA.	(REYNOLDS et al., 1978)
Carne bovina durante maturação	2W.cm ⁻² ; 45kHz; 2 min.	Modificações na microestrutura; Aumento da CRA.	(STADNIK; DOLATOWSKI; BARANOWSKA, 2008)
Carne bovina temperada	400-1000W.cm ⁻² ; 20kHz; 80-120 min.	Modificações na microestrutura; Aumento da CRA.	(ZOU et al., 2018)
Emulsão de carne suína	1000W.cm ⁻² ; 25kHz; 5.5 min.	Aumento do rendimento, maior estabilidade da emulsão (redução das perdas por exsudação); Aumento da coesividade, dureza e mastigabilidade.	(CICHOSKI et al., 2019)
Carne de coelho	110W.cm ⁻² ; 40kHz; 0 a 120 min.	Aumento do valor de a*, redução de b* aumento da absorção de sal durante a salga.	(GÓMEZ-SALAZAR et al., 2018).

Fonte: BARRETTO et al., 2022.

4.4.1. Capacidade de retenção de água (CRA)

A CRA configura-se como um dos parâmetros mais importantes que influenciam a qualidade da carne e dos produtos cárneos, afetando a variação de peso no transporte e o armazenamento, perda no descongelamento, encolhimento durante o cozimento, a suculência e a maciez da carne (GAULT, 1985). Além disso, também influencia a cor, textura e dureza da carne *in natura* e pós-cocção (HUGHES et al., 2014).

Como a utilização da tecnologia de ultrassom em carnes e produtos cárneos é relativamente nova, muitos trabalhos avaliam a CRA e as perdas de líquidos de carnes e produtos que passam por esse tipo de tratamento. Alves et al. (2018) ao avaliarem as perdas de peso em salame italiano tratado com ultrassom a 500W.cm⁻² de potência nominal, 25 kHz, durante 0, 3, 6 e 9 minutos não verificaram diferença significativa de peso em relação ao produto sem o uso do ultrassom. As perdas variaram de 30 a 40% em todos os tratamentos e, estão coerentes para este tipo de produto. Vimini, Kemp e Fox

(1983) também não relataram nenhum efeito sobre a CRA de amostras de bolos de carne reestruturados tratados com ultrassom em comparação com o controle, sem uso dessa tecnologia.

Por outro lado, trabalhos relatam modificações na microestrutura do músculo causadas pela cavitação – afetando diretamente a CRA. Reynolds et al. (1978) reportaram o aumento na CRA de presunto curado. Stadnik, Dolatowski e Baranowska (2008) ao aplicarem 2 W.cm^{-2} na maturação de carne bovina por 2 minutos a 45 kHz, também evidenciaram maiores valores para a CRA. Os autores justificam que a cavitação destrói parcialmente as proteínas miofibrilares e aumentam seu poder de ligar-se à água.

McDonnell et al., (2014a) aplicaram ultrassom com potência de 4,2; 11 e 19 W.cm^{-2} a 20 kHz por 10, 25 e 40 minutos durante o processo de salga úmida de carne suína em que relataram o aumento da extração das proteínas, contudo não observaram diferenças na CRA entre as amostras, com e sem a utilização do ultrassom.

O tempo e a potência de exposição ao ultrassom podem influenciar o comportamento da CRA no produto. Amiri, Sharifian e Soltanizadeh (2018) perceberam que o aumento da potência e do tempo de tratamento com ultrassom elevou a CRA em proteínas miofibrilares. O valor mais alto de CRA foi relacionado à amostra tratada por 30 minutos a potência de 300 W.cm^{-2} . Os autores justificaram que a maior interação água-proteína como resultado do menor tamanho de partícula das proteínas miofibrilares, bem como maior pH após o tratamento com ultrassom aumentou a CRA.

É possível perceber que as alterações na CRA são oriundas das modificações causadas pela cavitação na estrutura das proteínas miofibrilares do produto cárneo (ZOU et al., 2018). O tipo de proteína e a dimensão do dano e modificação em sua estrutura nortearão o impacto do uso do ultrassom sobre a CRA do produto. Nesse sentido é importante a condução de mais estudos envolvendo diferentes carnes e produtos cárneos, como o bacon. Ainda, vale ressaltar a necessidade de avaliar diferentes formatos de exposição às ondas ultrassônicas para aprofundar os conhecimentos sobre o impacto do ultrassom na CRA do produto.

4.4.2. Cor

A cor da carne e de produtos cárneos é uma das características mais importantes que influencia o consumidor no momento da compra (GRACIA; MAGISTRIS, 2013; NGAPO; MARTIN; DRANSFIELD, 2007). Está relacionada com os estados químicos

da mioglobina no sarcoplasma e depende de fatores *antemortem*: dieta, carcaça, genética; e de fatores *post-mortem*: cadeia do frio, processamento, ingredientes. Nesse sentido as transformações que a cor da carne e de produtos cárneos pode sofrer durante o processamento são de extrema importância para a indústria.

A avaliação da cor da carne é geralmente feita em uma destas duas formas, utilizando instrumentos ou visualmente. Geralmente a cor é avaliada por uma de duas finalidades: os valores de cor inicial são uma medida de qualidade e aceitação do consumidor, e as medições ao longo do tempo determinam a validade e por quanto tempo a carne mantém a boa aparência. É importante notar que cada unidade de pesquisa, seja em termos acadêmicos ou industriais, tem seus próprios protocolos/procedimentos para a coleta instrumental de cor da carne (SUINOCULTURA, 2022).

Existem vários instrumentos que podem ser usados para medir a cor da carne, mas todos eles darão os mesmos tipos de valores. Os instrumentos comumente usados em pesquisas científicas de carne são dos laboratórios Minolta e Hunter. Os valores das cores mais comuns são os do laboratório, que são relatados em L^* , a^* e b^* . Os valores L^* medem da clareza para a escuridão de uma amostra; a^* é uma medida do vermelho para o verde; e b^* , do azul para o amarelo. Da aceitabilidade inicial do produto, os valores L^* são especialmente importantes para carnes de porco e bovina frescas, com os valores mais altos indicando carne mais pálida. Para medir a validade da carne fresca na prateleira, a^* torna-se mais importante quando os valores mais altos indicam carne mais vermelha e os valores mais baixos são indicativos de mais verde (SUINOCULTURA, 2022).

Alguns estudos se preocupam com o comportamento da cor instrumental em carnes e produtos cárneos submetidos ao tratamento com ultrassom. Alves et al. (2018) ao produzirem salame italiano submetidos ao tratamento com ultrassom a 500W.cm^{-2} de potência nominal, 25 kHz, durante 0, 3, 6 e 9 minutos não reportaram nenhuma mudança nos parâmetros de cor instrumental. Resultado semelhante foi obtido por McDonnell, Lyng e Allen (2014) que não observaram mudanças em L^* e nem em a^* de carne suína com cura acelerada pelo uso de ultrassom com 4, 2, 11 e 19W.cm^{-2} de potência nominal, 20kHz, por 10, 25 e 40 minutos. Para Sikes et al. (2014) a cor da carne submetida ao ultrassom é pouco afetada, uma vez que o calor gerado pelo tratamento não é suficiente para desnaturar proteínas e pigmentos da carne. Cichoski et al. (2015) também não reportaram modificações nos parâmetros de cor instrumental de salsichas submetidas com ultrassom de potência 200W.cm^{-2} , 25 kHz por 10,53 minutos.

Em contrapartida, outros trabalhos destacam mudanças nos parâmetros de cor instrumental de carnes e produtos cárneos submetidos ao tratamento com ultrassom. Barretto et al. (2018a) reportaram que o uso do ultrassom no processamento de presuntos cozidos com baixo teor de sódio aumentou os valores de a^* , enquanto baixou os valores de L^* . Ferrentino & Spilimbergo (2016) mostraram que a combinação de aplicação de ultrassom e alta pressão de dióxido de carbono em presunto cozido não modificou o valor de L^* , contudo diminuíram os valores para a^* . Wójciak et al. (2019) ao submeterem carne seca fermentada a 480W.cm^{-2} por 10 minutos não relataram diferenças no parâmetro L^* , contudo evidenciaram uma redução para os valores de a^* até 93 dias de maturação do produto.

O ultrassom acelera as mudanças totais na cor da carne e do produto cárneo, limita a formação de oximioglobina e retarda a formação da metamioglobina (STADNIK; DOLATOWSKI, 2011). Gómez-Salazar et al. (2018) ao avaliarem os efeitos do ultrassom de 110W.cm^{-2} e 40 kHz sobre a cor instrumental de carne de coelho durante a salga úmida, perceberam que o ultrassom e a salga reduziram o valor de a^* , contudo com o uso do ultrassom, a redução de a^* foi menor comparada com a salga estática mostrando um efeito protetor do ultrassom para cor instrumental durante a salga úmida.

Com base nesses resultados, é possível afirmar que os efeitos do uso do ultrassom sobre a cor instrumental são bastante variáveis de acordo com o produto tratado e com as especificações do tratamento, nesse sentido é necessário ampliar os estudos sobre este efeito nesses tipos de produtos.

4.4.3. Textura

A textura é um dos atributos mais importantes da carne e dos produtos cárneos. Ela influencia a aceitação e o preço final do produto, visto que o consumidor está disposto a pagar mais pela garantia de uma carne mais macia. Logo, o conhecimento, o controle e a previsão da textura em carnes, especialmente o atributo referente à dureza, tem sido extensivamente pesquisado (MILLER et al., 2001).

Ao aplicarem ultrassom no processo de salga de carne suína, Ozuna et al. (2013) relataram aumento da dureza da carne. O mesmo comportamento foi relatado por Barretto et al. (2018a) e Ojha et al. (2016) ao aplicarem ultrassom durante o processo de produção de presunto cozido e de salga úmida de carne suína, respectivamente. Para esses autores, os efeitos do ultrassom na textura da carne podem estar associados à intensificação da

difusão de NaCl provocado pela cavitação, que provoca mudanças estruturais nas proteínas da carne e contribuem com o aumento da dureza.

Pinton et al. (2019) usaram o ultrassom para reduzir o teor de fosfato em emulsões cárneas, e perceberam que o ultrassom afetou a textura das emulsões. Eles relataram uma diminuição na dureza e mastigabilidade com aplicação de ultrassom durante 9 minutos nas amostras sem redução de fosfato e após 18 minutos de aplicação de ultrassom houve redução da dureza e mastigabilidade nas amostras com até 75% de redução de fosfato. Para os autores, este comportamento pode ser devido à maior retenção de água e gordura das amostras submetidas ao ultrassom quando comparadas às amostras não tratadas nos mesmos níveis de fosfato.

Siró et al. (2009) concluíram que diferentes tempos de aplicação e intensidades distintas do ultrassom podem resultar parâmetros da textura diferentes. Sob intensidades mais baixas ($2,0 \text{ W.cm}^{-2}$), não foi observado efeito sobre a textura. Na medida em que se aumenta a intensidade ($2,5$ e $3,0 \text{ W.cm}^{-2}$), uma diminuição da dureza da carne pode ser causada pelo enfraquecimento físico da estrutura da carne, aumentando sua maciez. Por outro lado, intensidades ultrassônicas acima de $3,5$ e $4,0 \text{ W.cm}^{-2}$ podem ser capazes de desnaturar as proteínas, diminuindo a capacidade de retenção de água e levando ao consequente enrijecimento do tecido

São nítidas as diferenças nos resultados sobre as influências da aplicação do ultrassom sobre os parâmetros de textura da carne e de produtos cárneos. A textura da carne é determinada pela estrutura, quantidade e estado de seus diferentes componentes, como proteína, água, gordura e tecido conjuntivo. Assim, além do tipo de produto, a composição e organização estrutural, juntamente com mudanças bioquímicas *post-mortem* e condições de armazenamento e processamento, são elementos fundamentais para descrever os mecanismos que definem a textura final da carne (CARDENAS; OLIVEIRA, 2016).

4.4.4. Características sensoriais

Os atributos sensoriais são fatores muito importantes para a qualidade na indústria de carnes e são responsáveis pelas escolhas de produtos pelos consumidores (MANDOUR et al., 2014). Ao considerar o uso de tecnologias emergentes na carne, como o ultrassom, os mecanismos de ação e os efeitos na transformação nos atributos sensoriais devem ser conhecidos (ALARCON-ROJO et al. 2019).

Peña-González et al. (2017) concluíram que a aplicação do ultrassom pode ser uma maneira viável para melhorar as propriedades sensoriais da carne, a carne tratada com ultrassom apresentou, para os provadores, maior maciez e maior suculência comparada ao controle, sem uso dessa tecnologia. Com isso, o ultrassom pode auxiliar no processo de maturação da carne reduzindo o período de maturação e preservando os parâmetros de qualidade da carne (DOLATOWSKI; STADNIK; STASIAK, 2007).

Barretto et al. (2018a) destacaram que o uso do ultrassom melhorou a aceitação sensorial para sabor, textura e aceitação global de amostras de presunto cozido. A melhor difusão do sal, extração das proteínas miofibrilares e capacidade de retenção de água contribuíram para aumentar as notas atribuídas pelos provadores na aceitação sensorial, comparadas a amostra sem o uso do ultrassom.

Pinton et al. (2019) conduziram análise de aceitação sensorial de mortadela com adição reduzida de fosfato e tratamento com ultrassom. Os autores verificaram melhores notas para o atributo textura para o produto com 50% de redução de fosfato que foi submetido ao ultrassom, comparado ao seu controle sem o uso dessa tecnologia.

Yeung & Huang (2017), ao submeterem lombo suíno ao ultrassom de 2200 W.cm^{-2} durante 0 a 6 minutos, perceberam que não houve mudança nas notas de aceitação sensorial para aparência e sabor. No entanto constataram que na medida em que aumentou-se o tempo de aplicação de ultrassom, aumentou-se também as notas atribuídas para maciez do produto. Os autores concluíram que para esse produto e nas condições que o ultrassom foi utilizado, ele representa uma alternativa viável para amaciar carnes e não impactar em sua aparência e sabor.

Como observado para os outros parâmetros físico-químicos, existe grande variabilidade no comportamento sensorial de carnes e produtos cárneos submetidos ao ultrassom – fato, pelo qual, representa a necessidade de avaliar as condições de processo para um produto específico (BARRETTO et al., 2018a).

4.5. Modelagem matemática de perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG) no processo de salga úmida e seca

Independente do processo aplicado, seja salga úmida ou seca, é necessário entender como a transferência de soluto ocorre e em qual velocidade. De forma análoga, a forma como o produto perde água decorrente da desidratação osmótica também revela a velocidade de salga. Ainda, como forma de avaliar diferentes processos ou tecnologias,

é necessário quantificar o efeito dos diferentes métodos nas respostas à transferência de massa (ALAMATIAN et al., 2019).

Para esta análise, são utilizados diferentes modelos matemáticos que, através de seus parâmetros, quantificam a velocidade do processo e os mecanismos envolvidos. A melhor abordagem a ser empregada deve ser analisada com base nas particularidades de cada modelo. Depois de definido o melhor modelo, ele é ajustado aos dados experimentais para produzir parâmetros matemáticos que permitem quantificar a influência das condições de processo na transferência de massa (CREMASCO, 2016). Por esta razão, são apresentados diferentes modelos potenciais recomendados para diferentes aplicações alimentícias.

4.5.1. Modelo de Peleg

Peleg (1988) propôs um modelo empírico para descrever a cinética de transferência de massa até que o processo atinja condições de equilíbrio. No presente estudo, o modelo pôde ser usado para prever as curvas cinéticas de *WL* e *SG* do processo de salga úmida até atingir condições de equilíbrio. A obtenção destes parâmetros é feita através das Equações (1) e (2):

$$SG = \pm \frac{t}{k_{s1} + k_{s2}t} \quad (1)$$

$$WL = \pm \frac{t}{k_{w1} + k_{w2}t} \quad (2)$$

onde *WL* é a perda de água (%) e *SG* é o ganho de sal (%) ao longo do processo. Nas equações anteriores, “±” “se torna +” se o processo é de desidratação (perda de água) ou ganho de sal (salga), e “-” se o processo é de hidratação ou perda de sólidos (dessalga). Os valores de k_{s1} e k_{w1} representam respectivamente as taxas iniciais ($t=0$) de perda de água (*WL*) e ganho de sal (*SG*). Realizando as derivadas obtemos as taxas para:

- Ganho de sólidos:

$$\left. \frac{d(SG)}{dt} \right|_{t=0} = \pm \frac{t}{k_{s1} + k_{s2}t} \quad (3)$$

$$\left. \frac{d(SG)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{(k_{s1} + k_{s2}t) \cdot 1 - t \cdot (k_{s2})}{k_{s1}^2 + 2 \cdot k_{s1} \cdot k_{s2}t + k_{s2}^2 \cdot t^2} \quad (4)$$

$$\left. \frac{d(SG)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{k_{w1}}{k_{s1}^2 + 2 \cdot k_{s1} \cdot k_{s2}t + k_{s2}^2 \cdot t^2} \quad (5)$$

$$\left. \frac{d(SG)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{k_{w1}}{k_{s1}^2 + 2.k_{s1}.k_{s2}(0) + k_{s2}^2.(0)t^2} \quad (6)$$

$$\left. \frac{d(SG)}{dt} \right|_{t=0} = \pm \frac{1}{k_{s1}} \quad (7)$$

- Perda de água

$$\left. \frac{d(WL)}{dt} \right|_{t=0} = \pm \frac{1}{k_{w1}} \quad (8)$$

Os valores de k_{w2} e k_{s2} possibilitam determinar, respectivamente, a perda de água (WL) e o ganho de sal (SG) em 'situação de equilíbrio', ou seja, quando $t \rightarrow \infty$. Da Equação (2) temos:

$$SG^\infty = \frac{1}{\frac{k_{s1} + k_{s2}t}{t}} \quad (9)$$

$$SG^\infty = \frac{1}{\frac{k_{s1}}{t} + k_{s2}} \quad (10)$$

$$SG^\infty = \frac{1}{\frac{k_{s1}}{\infty} + k_{s2}} \quad (11)$$

Portanto:

$$SG^\infty = \frac{1}{k_{s2}} \quad (12)$$

Similarmente, para a água, temos a partir da Equação (2):

$$WL^\infty = \frac{1}{k_{w2}} \quad (13)$$

4.5.2. Modelo de Weibull

O modelo exponencial de Weibull é tipo de modelo empírico, simples e que, geralmente, descreve com boa precisão processos como a salga de carnes, assim como o ganho ou perda de água (AYKIN-DINÇER, 2021). A Equação (14) e (15) apresentam este modelo:

Para ganho de sal:

$$\frac{SG_t - SG_0}{SG^\infty - SG_0} = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (14)$$

Para perda de água:

$$\frac{WL_t - WL^\infty}{WL_0 - WL^\infty} = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (15)$$

onde, no caso do sólidos ou NaCl, SG_0 , SG^∞ e SG_t , são os ganhos de sólidos ou NaCl no tempo zero, tempo t , e no equilíbrio, respectivamente. No caso de perda de água, tem-se que WL_0 , WL_t e WL^∞ representa a perda de água no tempo zero, tempo t , e no equilíbrio, respectivamente. O parâmetro α é o parâmetro de Weibull, dado em unidades, e representa o tempo necessário para atingir 63% dos valores de perda de água ou ganho de sólidos no equilíbrio. O parâmetro β é um parâmetro de forma (adimensional), estando seu inverso relacionado à taxa de processo.

4.5.3. Modelo Exponencial

O modelo exponencial é um modelo clássico empírico, simples e que geralmente promove boa descrição de processos de salga de carnes. Este modelo é desenvolvido a partir do modelo de Weibull, Equação (14) e (15). Assim, a partir da equação (14), temos:

$$\frac{SG_t - SG^\infty}{SG_0 - SG^\infty} + 1 = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] + 1 \quad (16)$$

$$1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] = 1 - \left(\frac{SG_t - SG^\infty}{SG_0 - SG^\infty} \right) \quad (17)$$

$$\frac{SG_0 - SG^\infty - SG_t + SG^\infty}{SG_0 - SG^\infty} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (18)$$

$$\frac{SG_0 - SG_t}{SG_0 - SG^\infty} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (19)$$

Como o ganho de sólidos no início é zero, obtém-se o modelo exponencial das Equações (20) e (21):

$$\frac{0 - SG_t}{0 - SG^\infty} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (20)$$

$$\frac{SG_t}{SG^\infty} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (21)$$

No caso de perda de água, a Equação (15) resulta na Equação (22):

$$\frac{WL_t}{WL^\infty} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (22)$$

4.5.4. Modelo de Azuara

Proposto por Azuara et al. (1992), este modelo baseia-se na realização de um balanço de massa no produto. Ele busca descrever a cinética do ganho de solutos ou perda de água em desidratação osmótica até atingir a condição de equilíbrio. Neste modelo, o balanço de agente osmótico no interior do produto pode ser representado pela Equação (23):

$$SG_t = SG^\infty - SG^* \quad (23)$$

onde SG_t representa o ganho de soluto pela amostra em um tempo t , SG^∞ o ganho de soluto no equilíbrio e SG^* o conteúdo de soluto restante no tempo t para que o equilíbrio seja alcançado.

O parâmetro SG^∞ possui um valor fixo para as condições estabelecidas de temperatura e concentração da salmoura, enquanto que SG_t e SG^* dependem do tempo de processo. O valor de SG_t tende a aumentar ao longo do processo enquanto que SG^* diminui. Dessa forma, estes dois parâmetros podem se correlacionar através de um novo parâmetro K . Este novo parâmetro é uma função do tempo e da taxa de ganho de soluto, podendo ser escrito em termos do tempo t e de uma nova constante k (Equação (24)):

$$SG^* = \frac{SG_t}{K} = \frac{SG_t}{k.t} \quad (24)$$

Ao substituir a Equação (24) na Equação (23) e, após rearranjo dos termos, têm-se:

$$SG_t = SG^\infty - \frac{SG_t}{k.t} \quad (25)$$

$$SG_t \left(1 + \frac{1}{k.t} \right) = SG^\infty \quad (26)$$

$$SG_t \left(\frac{k.t+1}{k.t} \right) = SG^\infty \quad (27)$$

$$SG_t = \frac{k \cdot t \cdot (SG^\infty)}{1 + k \cdot t} \quad (28)$$

A Equação (28) pode ser empregada para descrever processos de salga úmida e salga seca em diferentes tipos de alimentos, independentemente das configurações geométricas do alimento (AZUARA et al., 1992). O ganho de soluto no equilíbrio (SG^∞) e o parâmetro k podem ser obtidos por meio de uma regressão linear dos dados experimentais de ganho de soluto por tempo. A forma linearizada para a Equação (28) é dada por:

$$\frac{t}{SG_t} = \frac{1 + k \cdot t}{k(SG^\infty)} \quad (29)$$

$$\frac{t}{SG_t} = \frac{1}{k(SG^\infty)} + \frac{t}{(SG^\infty)} \quad (30)$$

Similarmente, ao analisar a perda de água, o balanço de massa no interior do produto é dado por:

$$WL_t = WL^\infty - WL^* \quad (31)$$

onde WL_t representa a perda de água da amostra em um determinado tempo t , WL^∞ a perda de água no equilíbrio e WL^* o teor de água restante no tempo t até que o equilíbrio seja atingido.

Analogamente como realizado para o ganho de soluto, o parâmetro WL^∞ possui valor fixo para as condições estabelecidas, enquanto o WL_t e o WL^* dependem do tempo de processo. A relação entre WL_t e WL^* também pode ser dada por um parâmetro K_a . Este novo parâmetro, por sua vez, pode ser escrito em termos do tempo t e de uma nova constante k_a , conforme representado pela Equação (32).

$$WL^* = \frac{WL_t}{K_a} = \frac{WL_t}{k_a \cdot t} \quad (32)$$

Substituindo a Equação (32) na Equação (31) e rearranjando os termos têm-se:

$$WL_t = WL^\infty - \frac{WL_t}{k_a \cdot t} \quad (33)$$

$$WL^{\infty} = WL_t \left(1 + \frac{1}{ka \cdot t}\right) \quad (34)$$

$$WL^{\infty} = WL_t \left(\frac{ka \cdot t + 1}{ka \cdot t}\right) \quad (35)$$

$$WL_t = \frac{ka \cdot t (WL^{\infty})}{1 + ka \cdot t} \quad (36)$$

Assim como a Equação (28), a Equação (36) também pode ser utilizada para processos de perda de umidade na salga úmida e seca de diferentes tipos de alimentos, sem restrições quanto à configuração geométrica do alimento (AZUARA et al., 1992). O valor da perda de água no equilíbrio (WL_t) e o parâmetro k_a podem ser obtidos da regressão linear da Equação (36), dada por:

$$\frac{t}{WL_t} = \frac{1 + k \cdot t}{k(WL^{\infty})} \quad (37)$$

$$\frac{t}{WL_t} = \frac{1}{k(WL^{\infty})} + \frac{t}{(WL^{\infty})} \quad (38)$$

4.5.5. Relação entre os modelos de Peleg e Azuara

Uma abordagem a ser utilizada é relacionar os modelos de Peleg e Azuara através da igualdade das constantes empíricas dos dois modelos. A partir da Equação (28), para ganho de soluto do modelo de Azuara, temos:

$$SG_t = \frac{k \cdot t \cdot (SG^{\infty})}{1 + k \cdot t} \quad (28)$$

Rearranjando, obtém-se que:

$$SG_t = \frac{t}{\frac{1 + k \cdot t}{k \cdot (SG^{\infty})}} \quad (39)$$

$$SG_t = \frac{t}{\frac{1}{k \cdot (SG^{\infty})} + \frac{t}{(SG^{\infty})}} \quad (40)$$

Ao se comparar com o modelo de Peleg (Equação (1)), conclui-se que:

$$SG = \pm \frac{t}{k_{s1} + k_{s2}t} \quad (1)$$

$$k_{s1} = \frac{1}{k \cdot (SG^{\infty})} \quad (41)$$

$$k_{s2} = \frac{1}{SG^{\infty}} \quad (42)$$

$$k = \frac{k_{s2}}{k_{s1}} \quad (43)$$

Para o caso da perda de água, a Equação (36) do modelo de Azuara pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$WL_t = \frac{ka \cdot t(WL^{\infty})}{1 + ka \cdot t} \quad (36)$$

$$WL_t = \frac{t}{\frac{1 + ka \cdot t}{ka \cdot (WL^{\infty})}} \quad (44)$$

$$WL_t = \frac{t}{\frac{1}{ka \cdot (WL^{\infty})} + \frac{t}{(WL^{\infty})}} \quad (45)$$

Ao se comparar o modelo de Peleg, Equação (2), conclui-se que:

$$WL = \frac{t}{\frac{1}{k_{w1}} + k_{w2}t} \quad (2)$$

$$k_{w1} = \frac{1}{ka \cdot (WL^{\infty})} \quad (46)$$

$$k_{w2} = \frac{1}{WL^{\infty}} \quad (47)$$

$$ka = \frac{k_{w2}}{k_{w1}} \quad (48)$$

4.5.6. Modelo de difusão

O modelo de difusão, apresentado também como 2ª Lei de Fick, é um modelo teórico amplamente utilizado para representar processos de transferência de massa nos mais diferentes produtos alimentos, incluindo os próprios produtos cárneos (ALAMATIAN et al., 2019; AYKIN-DINÇER, 2021; KANG et al., 2016; SCHMIDT; CARCIOFI; LAURINDO 2009).

A 2ª Lei de Fick assume que a transferência de massa por difusão ocorre por unidade de área, utilizando o gradiente de concentração como força motriz. Fazendo uso desta teoria, o balanço de massa para água e para o soluto (sal) em processos de salga úmida ficaria:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 C_A \quad (49)$$

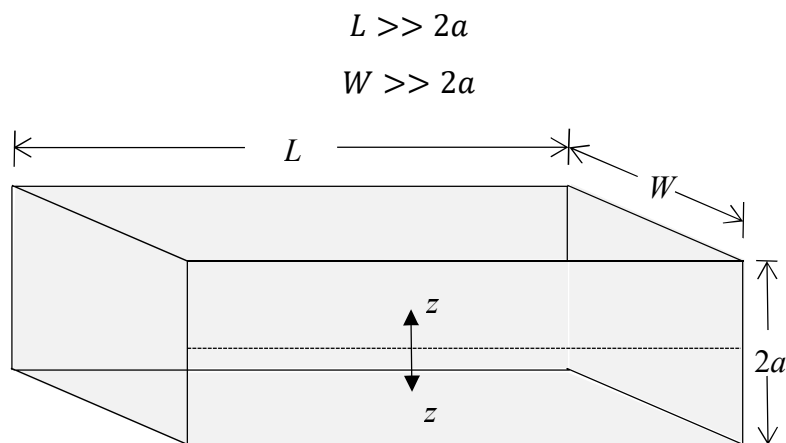
onde C_A representa a concentração de água ou soluto ($\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$), t o tempo (s) e D_{ef} o coeficiente de difusão efetivo em ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$).

Um grande número de soluções está apresentado na literatura, ao utilizar a equação da Lei de Fick, para geometrias e condições de contorno variadas (CRANK, 1975). Entretanto, todas estas soluções são empregadas para formas geométricas simples (corpos semi-infinitos, placas, cilindros e esferas). Além disso, ele considera o coeficiente de transferência de massa como um valor constante ou variante com a concentração de soluto.

Para o caso de uma placa plana infinita, o meio é considerado infinito quando a extensão da dimensão onde acontece a difusão for ser muito menor quando comparada às outras dimensões (CREMASCO, 2016). No caso de uma placa plana infinita, ou com comprimento e largura bem maiores do que a espessura, qual haverá difusão unidirecional.

Considerando a perda de água ou ganho de sal de uma amostra de carne submetida à salmoura de NaCl, a amostra de carne deve ser preparada de tal modo que o comprimento de cada placa plana venha a ser muito maior do que a espessura ($L \gg 16a$), como ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Difusão de sal e água em regime transiente ao longo de uma manta de carne considerada como uma placa plana infinita.



Fonte: Adaptado de Cremasco, 2016.

A equação da continuidade que descreve a difusão em regime transiente de água ou sal na amostra de carne seria dada como:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (50)$$

onde C_A representa a concentração de água ou sal ($\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$), t o tempo (s), D_{ef} o coeficiente de difusão efetivo ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$) e z a coordenada espacial no sistema cartesiano (m).

Utiliza-se as condições de contorno abaixo para o desenvolvimento da Equação de Fick:

- Condição Inicial para $t = 0$; $C_A = C_{A_0}$, para qualquer z ;
- Condição de Contorno 1: para $t > 0$; em $z = 0$; $\left. \frac{\partial C_A}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$
- Condição de Contorno 2: para $t > 0$; em $z = a$; $C_A = C_A^*$

Nota-se que para $t > 0$, em $z = a$, a concentração do soluto (água ou sal) na superfície da placa plana assume valores encontrados no equilíbrio, os quais podem ser determinados em experimentos de salga realizados em tempos prolongados. Além disso, para $t > 0$, em $z = 0$, admite-se a continuidade de fluxo do soluto.

Visando obter uma solução para a equação de continuidade (50), define-se a seguinte concentração adimensional para o soluto A:

$$\theta = \frac{C_A - C_A^*}{C_{A_0} - C_A^*} \quad (51)$$

A equação (50) é retomada como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (52)$$

A solução da Equação (52) é obtida utilizando a técnica da separação das variáveis. Após uma série de procedimentos matemáticos de simplificação e rearranjo, tem-se que:

$$\theta(z, t) = \left(\frac{C_A - C_A^*}{C_{A_0} - C_A^*} \right) = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{2n+1} \right] \cdot \cos \left[\left(\frac{2n+1}{2a} \right) \pi z \right] \cdot \exp \left(- \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4a^2} D_{ef} \cdot t \right) \quad (53)$$

Identificando os adimensionais $\eta = \frac{z}{a}$ e $\gamma_n = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$, a Equação (112) fica:

$$\theta(\eta, t) = \theta = 2 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{\gamma_n} \right] \cdot \cos(\eta \cdot \gamma_n) \cdot \exp\left(-\gamma_n^2 \frac{D_{eff} t}{a^2}\right) \quad (54)$$

Exceto pelos termos γ_n presentes no argumento da função exponencial da Equação (54), o grupo restante é reconhecido como o número de Fourier mássico. Ele representa um tempo adimensional em função das características do soluto e do meio difusivo:

$$Fo_M = \frac{D_{eff} t}{z^2} \quad (55)$$

sendo o denominador z_1 a distância do início da difusão à superfície da matriz considerada. Na presente situação este parâmetro é igual à semi espessura da placa.

A Equação (54), portanto, é retomada de acordo com número de Fourier:

$$\theta(\eta, Fo_M) = \theta = 2 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{\gamma_n} \right] \cdot \cos(\eta \cdot \gamma_n) \cdot \exp(-\gamma_n^2 Fo_M) \quad (56)$$

4.6. Isotermas de sorção

Conhecer o processamento detalhado de um produto é uma etapa importante para garantir a qualidade do produto final. Entretanto, para garantir a qualidade do produto ao longo de toda a cadeia de suprimentos, é necessário conhecer como o produto se comporta durante seu armazenamento. Nesse sentido, as propriedades de sorção de água de um dado produto são um dos parâmetros que influenciarão os processos de manuseio, processo, estocagem e o próprio consumo do produto (LABUZA, 1975).

Essas propriedades podem ser determinadas e avaliadas através de isotermas de sorção de água, visando expressar a atividade de água (a_w) e umidade de equilíbrio (X_{eq}) de um produto em uma temperatura fixa. (FREITAS et al., 2016). A definição de umidade de equilíbrio consiste no teor de umidade na qual a pressão de vapor de água é igual a pressão de vapor da umidade do ambiente – ou seja, a umidade relativa atmosférica. Nestas condições, não existe mudanças no teor de água.

A Figura 4.5 mostra o processo de equilíbrio entre o alimento e o ambiente., sendo (a) o alimento carregado de moléculas de água; (b) o ar com menor umidade relativa, em uma temperatura constante, com as moléculas de água que estavam no alimento migrando para o ar até atingir a umidade de equilíbrio; e (c) as moléculas de água do ar e do produto em equilíbrio (BECKER, 1956). Na última etapa de equilíbrio, a umidade do alimento dependerá de sua composição, estrutura e condições ambientais, como a temperatura, por exemplo. Sendo assim, na medida em que ocorrem maiores diferenças entre a umidade de equilíbrio do produto e a umidade relativa do ambiente, maior serão as taxas de perda/ganho de água.

Figura 4.5 - Esquema de um processo de equilíbrio molecular entre o alimento e o ambiente.



Fonte: Adaptado de Becker, 1956.

A água, composto mais abundante nos alimentos frescos ou *in natura*, influencia diretamente no processo e nas reações químicas dos alimentos. Essas propriedades tem um impacto na qualidade final do produto, já que a forma como ela está relacionada com a matriz tem influência nas taxas de reações durante o processamento e estocagem (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

Nos alimentos, as moléculas de água podem estar em sua forma ligada e/ou livre. Na forma ligada, a água encontra-se associada aos solutos e outros constituintes não aquosos, como proteínas e polissacarídeos. Dessa maneira, as moléculas não se

comportam como água pura, apresentando mobilidade reduzida, não congelável a -40 °C e indisponível para reações enzimáticas e microbiológicas (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). Diferentemente da água ligada, a água livre se assemelha a água pura, estando disponível para reações enzimáticas e crescimento de microrganismos (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Portanto, o conteúdo total das duas frações de água em um produto é conhecido como umidade. A fração de água livre, especificamente, disponível em um alimento é medida através da atividade de água (a_w) através da Equação (57):

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (57)$$

onde a_w é a atividade da água (adimensional); P é a pressão de vapor da água no alimento em uma dada temperatura; P_0 é a pressão de vapor da água pura a essa mesma temperatura.

Em condições de equilíbrio, existe uma relação entre a a_w do alimento e a umidade relativa de equilíbrio (URE) de um ambiente fechado (BASU et al., 2006), que pode ser expressa através da Equação (58):

$$a_w = \frac{URE}{100} \quad (58)$$

A relação entre a URE e a a_w funciona como um índice da força motriz para a transferência de moléculas de água entre o alimento e o ar da atmosfera no qual ele está exposto.

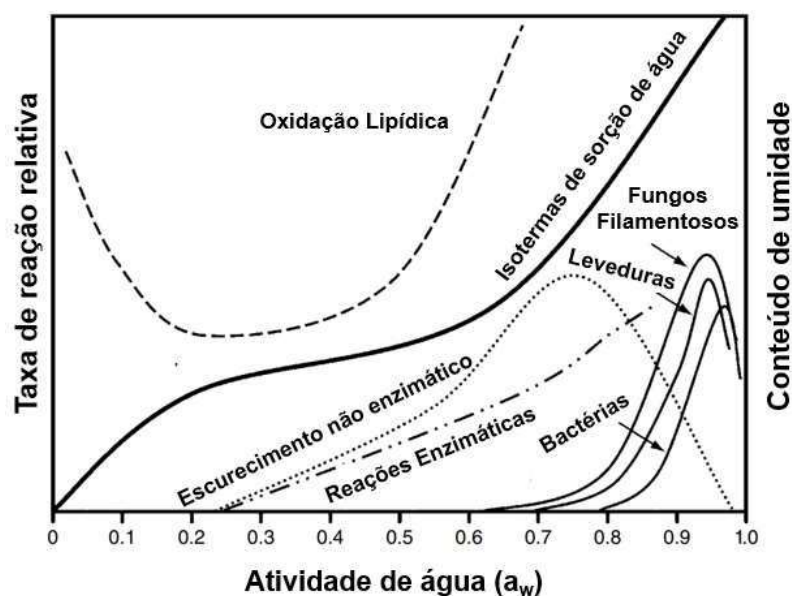
Labuza, Tannembaum e Karel, (1970) publicaram uma revisão sobre a influência da atividade de água sobre as reações químicas nos alimentos. Desde então, vários estudos (BARRETTO et al., 2018b; BETIOL et al., 2020; ROSA et al., 2021; SÁNCHEZ-TORRES et al., 2021; SILVA et al., 2021) foram realizados com o intuito de descrever a forma que a água se encontra nos alimentos em diferentes condições de armazenamento e/ou secagem, visando avaliar a sua disponibilidade para atuar como solvente e promover reações químicas ou bioquímicas (LABUZA, 1977).

Várias reações químicas (Figura 4.6) podem ocorrer nos alimentos, resultando na deterioração do produto e/ou matéria-prima em pouco tempo. A atividade de água dos alimentos influencia diretamente nessas reações, como a oxidação lipídica, degradação de vitaminas e reações de escurecimento enzimático e não-enzimático, entre outras. Além disso, alterações específicas na cor, aroma, sabor, textura, estabilidade, e aceitabilidade

de alimentos *in natura* e processados têm sido relacionadas com a a_w (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2020).

A Figura 4.6 mostra o comportamento de algumas reações que ocorrem nos alimentos, em função da atividade de água. Com exceção da oxidação lipídica, todas as outras taxas de reações têm sua velocidade reduzida com a redução da atividade de água até 0,2. Em níveis de atividade de água entre 0,2 e 0,5, a oxidação de lipídios apresenta uma taxa mínima de reação, sendo que abaixo de 0,2 e acima de 0,5 a taxa de reação da oxidação lipídica sofre uma rápida elevação. Dessa forma, caso o alimento seja susceptível a oxidação lipídica, valores muito baixos de atividade de água podem predispor o alimento a rancidez oxidativa. Este é o caso específico de cortes e produtos cárneos com alto teor de gordura, como o bacon. No que consiste à proliferação microbiana, os fungos filamentosos são os microrganismos que possuem maior resistência a baixas a_w (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2020).

Figura 4.6 - Mapa de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água.



Fonte: Adaptado de Barbosa-Cánovas et al., 2020.

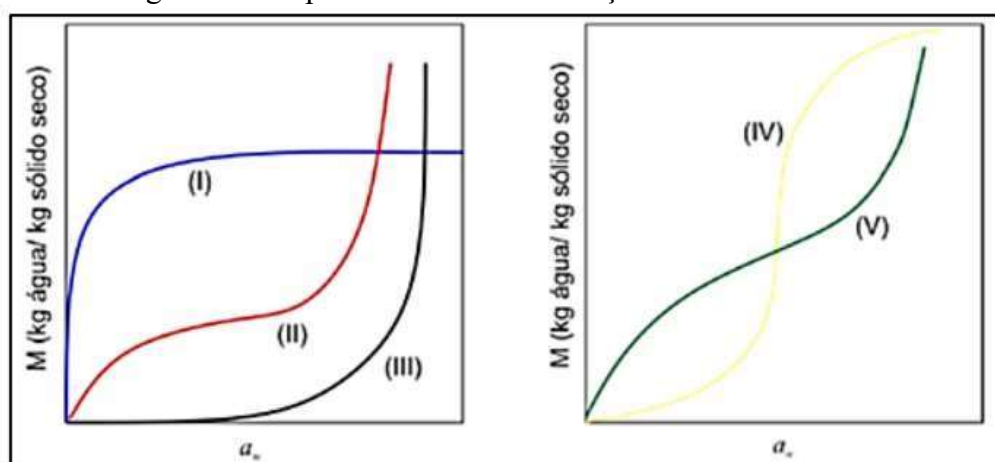
Vale ressaltar que o fato do alimento apresentar alta atividade de água não significa alta umidade, mas, sim, alta quantidade de água livre em sua matriz. Com base nisso, foi definido 3 principais grupos: alimentos com baixa ($<0,60$), intermediária (entre 0,60 e 0,90) e alta atividade de água ($>0,90$) (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

A determinação das isotermas de sorção proporcionam informações básicas para o desenvolvimento e projeto de diversas operações unitárias tais como concentração, secagem, hidratação e estocagem. No que diz respeito à estocagem, o estudos das propriedades de sorção são essenciais na escolha da melhor embalagem e condições de armazenagem com a finalidade de aumentar a vida útil dos alimentos pela redução de alterações indesejáveis (STAUDT et al., 2013; BARRETTO et al., 2018a; SHARMA et al., 2018). Estas curvas podem ser obtidas de três diferentes formas:

- i. *Isoterma de dessorção*: obtida quando o material úmido é submetido a uma atmosfera com umidade relativa menor que a do material;
- ii. *Isoterma de adsorção*: obtida quando um material completamente seco é submetido a uma atmosfera com umidade relativa maior que a do material;
- iii. *Isoterma de sorção*: quando material é submetido a diferentes ambientes de umidade relativa, ocorrem os dois fenômenos: dessorção, quando sua umidade é maior que do ambiente, e adsorção, quando sua umidade é menor que a do ambiente;

O processo de sorção de água em alimentos, no geral, ocorre de maneira sigmoidal ou não-linear. Cinco classificações principais são propostas por Brunauer et al. (1940) baseadas no formato das isotermas são apresentadas na Figura 4.7:

Figura 4.7 - Tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals.



Fonte: Adaptado de Brunauer et al., 1940.

Nesta Figura 4.7, a curva Tipo I (também conhecida como isoterma de Langmuir) mostra que existe uma quantidade máxima de moléculas de água adsorvidas que não irá variar independentemente da umidade relativa. As isotermas do Tipo II, a sorção de água

ocorre de forma sigmoideal. A curvatura inicial voltada para baixo representa as moléculas de água em formação de uma monocamada na superfície do adsorvente, enquanto que as multicamadas são posteriormente formadas e a umidade passa a aumentar facilmente. A água presente na monocamada será, portanto, mais estável e durável do que a água presente na multicamada. As isotermas do Tipo III são típicas de materiais cristalinos, como açúcares e sal. O ganho de umidade aumenta mais facilmente quando os cristais se dissolvem, acima de uma determinada umidade de equilíbrio (ou ponto deliquescente) (BARBOSA CÁNOVAS et. al., 2020). Por fim, nas curvas do Tipo IV e V, as moléculas adsorvem até um nível máximo de pressão de vapor, sendo este inferior a do ar ambiente (BARBOSA CÁNOVAS et. al., 2020).

A Tabela 4.2 apresenta algumas informações sobre as isotermas de sorção de água em produtos cárneos, processados ou não. Estes trabalhos buscaram avaliar o efeito, não somente da temperatura, mas de certos ingredientes nas propriedades de sorção. Pode-se observar, também, que as propriedades de sorção de água da maioria destes produtos seguem a tendência de isotermas do Tipo II (HELDMAN & LUND, 1992).

Neste tipo de isoterma (Figura 4.8), especificamente, a forma como as moléculas estão distribuídas podem ser classificadas como: i) água fortemente ligada, formando a umidade de monocamada pela ligação das moléculas de água com grupos polares de certos compostos, especialmente NH_3^+ e COO^- das proteínas e OH^- dos amidos, ou para promoção da cristalização de açúcares e sais; ii) água ligada, formando as multicamadas por pontes de hidrogênio e ligações dipolo-dipolo em torno de grupos hidrofílicos; e iii) água fracamente ligada, disposta em macrocapilares disponível para reações químicas e microbiológicas (BARBOSA-CÁNOVAS et. al., 2020).

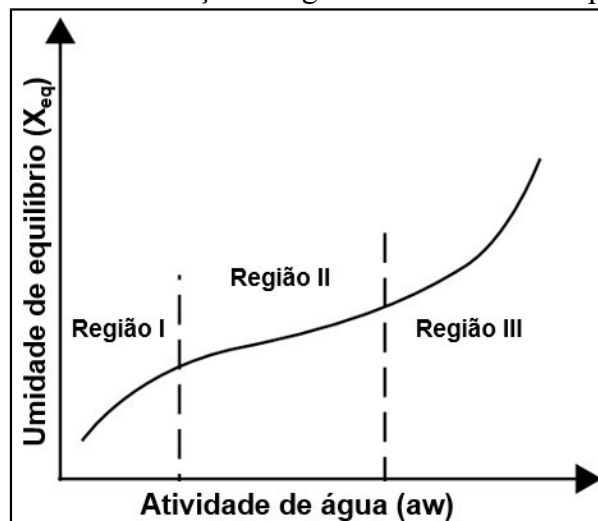
Normalmente, as moléculas de que se encontram na primeira região são as que estão mais fortemente ligadas à matriz. Elas não são congeláveis e não estão disponíveis para reações químicas ou, mesmo, para atuar como plastificantes. Por isso, constitui uma quantidade muito pequena da água total do alimento, geralmente correspondendo a

atividades de água abaixo de 0,3 (ORDÓÑEZ, 2005). As moléculas da região II apresentam remoção mais fácil, quando comparada a região I. Quanto à região III, as moléculas estão em quantidade mais abundante e de fácil congelamento e evaporação. As moléculas se encontram nestas condições quando a atividade de água está acima de 0,70.

A faixa que compreende cada região é influenciada pela temperatura do ambiente, pela composição química dos solutos e estado físico-químico de seus constituintes.

Enquanto que amido e cereais absorvem mais água sob baixas atividades de água, produtos com alto teor de proteína, como a carne, tendem a absorver água com mais facilidade em altas atividades de água. Materiais no estado amorfo, termodinamicamente instável comparado ao cristalino, as matrizes tendem a apresentar maior higroscopicidade quando se encontram em um estado cristalino (BARBOSA-CÁNOVAS et. al., 2020).

Figura 4.8 - Isoterma de sorção de água de um alimento hipotético do tipo II.



Fonte: Adaptado de Heldman & Lund, 1992.

Tabela 4.2 - Características de sorção de água de carnes e produtos cárneos.

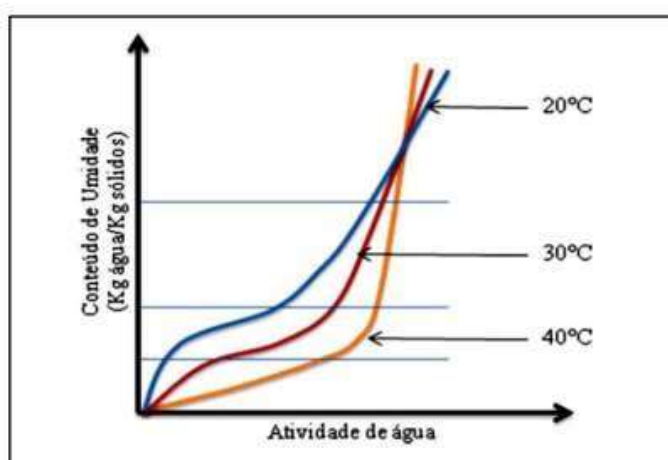
Produto	Efeito estudado	Classificação	T (°C)	URE (%)	Tipo de Obtenção	Melhor modelo	Referência
Presunto curado	Temperatura e Composição química	Tipo III	7-27	6,25-96,15	Sorção	GAB	(BETIOL et al., 2020)
Presunto cozido	Temperatura e da Composição química	Tipo II	2-30	6,1-92	Sorção	GAB	(BARRETTO et al., 2018b)
Fígado suíno	Temperatura	Tipo II	0-50	10,3-99,9	Dessorção	GAB	(SÁNCHEZ-TORRES et al., 2021)
Carne bovina	Teor de sal (0, 5, 10, 15 e 20 g / 100 g db)	Tipo II e III	25	***	Adsorção	BET	(AYKIN-DINÇER; ERBAŞ, 2018)
Filetes de pirarucu	Teor de sal (10, 20, 30 e 40 g / 100 g db)	Tipo II e III	25	***	Adsorção e Dessorção	Halsey e GAB	(MARTINS; MARTINS; PENA, 2015)
Carne de tambaqui	Teor de cloreto de sódio e da Temperatura	Tipo III	5-29	2-90	Sorção	Peleg	(MOLINA -FILHO et al., 2006)
Couro bovino	Temperatura	Tipo II	30-70	5-100	Adsorção e Dessorção	GAB	(FAKHFAKH; MIHOUBI; KECHAOU, 2018)
Carne de jacaré	Temperatura	Tipo III	10-35	11-87	Sorção	GAB	(LOPES-FILHO et al., 2002)
Carne de frango	Temperatura	Tipo II	4-30	25,5-94,2	Dessorção	Ferro- Fontan and GAB	(DELGADO; SUN, 2002b)
Carne de cabra crua	Temperatura	Tipo II	10-50	19,5-93,2	Dessorção	Mizrahi e GAB	(SINGH et al., 2006)

Fonte: (BETIOL et al., 2020)

4.6.1. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção

Tanto o processamento como o armazenamento de produtos alimentícios estão sujeitos à grandes variações de temperatura. Por isso, entender como a temperatura influencia as propriedades de sorção é de grande importância tecnológica (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002). De forma geral, a Figura 4.9 mostra a tendência das alterações na atividade de água de um alimento submetido diferentes temperaturas de processamento e/ou armazenamento.

Figura 4.9 - Tendência das alterações na atividade de água de um alimento submetido a diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Barbosa-Cánovas et al., 2007.

Em uma mesma umidade de equilíbrio, o aumento da temperatura geralmente promove o aumento da atividade de água dos alimentos. Por outro lado, em uma mesma atividade da água, o aumento da temperatura geralmente reduz a umidade de equilíbrio dos alimentos (BARBOSA-CÁNOVAS et. al., 2007). Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da energia cinética e do estado de excitação das moléculas de água com o aumento da temperatura. Esse fenômeno reduz as forças de atração entre as moléculas de água, tornando-as menos estáveis e com maior separação da matriz (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

4.6.2 Efeito da composição química nas isotermas de sorção

Analogamente à temperatura, a composição química dos alimentos pode afetar a forma como as moléculas de água se ligam na matriz alimentar, afetando a estabilidade dos alimentos (RIZVI, 2005). Essas alterações na atividade de água podem influenciar

não só o desenvolvimento microbiano, mas também em reações enzimáticas, oxidativas e propriedades sensoriais como a textura dos alimentos.

Embora a composição química possa afetar as isotermas de sorção dos alimentos, poucos estudos foram realizados nesse sentido. Barreto et al. (2018) estudaram a influência da temperatura e composição química nas isotermas de sorção de água de presuntos cozidos. Os autores relataram que quanto menor for a relação umidade/proteína ou quanto menor for o teor de gordura, maior será a umidade de equilíbrio (X_{eq}) do presunto cozido. Por ser um produto com alto teor de umidade, a liberação de fluidos quando retirado da embalagem e fatiado é indesejável para esse produto.

Betiol et al. (2020) estudaram a influência da temperatura e da composição química nas isotermas de sorção de água de presunto curado. Os autores relataram que presuntos curados com teor de sódio semelhante, porém com menor teor de proteínas e maior teor de gordura, apresentaram maiores umidades de equilíbrio (x_{eq}), o que contraria alguns relatos (BARRETTO et al., 2018b; ERBAŞ et al., 2016; IGLESIAS; , HÉCTOR; CHIRIFE, 1982) da literatura. Tal observação pôde estar relacionada com a desnaturação, reticulação e interação de proteínas nativas ou desnaturadas com lipídeos. durante os processos de salga e secagem.

Aykin-Dinçer & Erbaş (2018) investigaram a influência de diferentes teores de NaCl (0, 5, 10, 15 e 20%) sobre a cinética de secagem e nas isotermas de adsorção de fatias de carne bovina. Os autores relataram que as isotermas de carne seca com 0% de NaCl apresentaram um comportamento de sorção de água do Tipo II, enquanto que a adição de sal fez com que esse comportamento mudasse para o tipo III, especialmente para amostras com 15 e 20 g NaCl / 100 g (base seca). As isotermas do tipo III foram encontradas para produtos semelhantes como filé de pirarucu salgado ((MARTINS; MARTINS; PENA, 2015), carne de tambaqui salgada (MOLINA-FILHO et al., 2006) e carne de jacaré salgada (LOPES-FILHO et al., 2002).

4.6.3. Modelagem matemática das isotermas de sorção

Para efeitos de mensuração e comparação das propriedades de sorção de alimentos em diferentes condições, faz-se uso da modelagem matemática. Ainda, os parâmetros de alguns modelos proporcionam informações essenciais para compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo de sorção de água.

Dessa forma, existe uma grande quantidade de modelos matemáticos que foram desenvolvidos para descrever as isotermas de sorção de água dos alimentos. Entretanto, nenhum desses modelos é capaz de fornecer resultados precisos para todos os alimentos em todas as faixas de atividade de água, uma vez que a água está associada à matriz por diferentes forças e mecanismos.

Os modelos matemáticos mais comumente utilizados para descrever as isotermas de sorção de água estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Modelos mais utilizados para ajustar as isotermas de sorção de água dos alimentos.

Modelo	Equação	Referência
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times k \times aw}{(1 - k \times aw)(1 + (C - 1)k \times aw)}$	(LOMAURO; BAKSHI; LABUZA, 1985)
Halsey	$X_{eq} = (-h_1 \times \ln(aw))^{\frac{-1}{h_2}}$	(HALSEY, 1948)
Henderson	$X_{eq} = (-\frac{1}{H_1} \times \ln(1 - aw))^{\frac{1}{H_2}}$	(BOQUET et al., 1978)
Iglesias & Chirife	$X_{eq} = A + B \times \frac{aw}{1 - aw}$	(CHIRIFE; IGLESIAS., 1978)
Oswin	$X_{eq} = M \times (\frac{aw}{1 - aw})^N$	(OSWIN, 1946)
Peleg	$X_{eq} = k_1 \times aw^{n_1} + k_2 \times aw^{n_2}$	(PELEG; 1993)
Smith	$X_{eq} = A - B \times (\ln(1 - aw))$	(SORMOLI; LANGRISH, 2015)
White & Eiring	$X_{eq} = \frac{1}{A + B \times aw}$	(SORMOLI; LANGRISH, 2015)
BET	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times aw}{(1 - aw)(1 - aw + C \times aw)}$	(BRUNAUER; EMMET; TELLER, 1938)

$A, B, C, k, k_1, n_1, k_2, n_2, M, N, h_1, h_2, H_1$ e H_2 são constantes dos modelos, X_m representa o teor de umidade da monocamada, X_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio e aw é a atividade de água.

Esses modelos, propostos para prever as isotermas de sorção de água dos alimentos, são classificados como teóricos, semi empíricos e empíricos (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007). Modelos como BET e GAB são baseados na umidade da monocamada e, por isso, são classificados como modelos teóricos. As constantes destes modelos, ao contrário dos modelos empíricos ou semi-empíricos, fornecem informações sobre a umidade da monocamada e forças de ligação entre as moléculas de água e a matriz alimentícia. A umidade da monocamada, por sua vez, tem sido relatada como a faixa de umidade na qual os alimentos desidratados atingem sua estabilidade físico-química

(TONON et al., 2009). As constantes obtidas do modelo de BET (X_m (kg/kg); C (adimensional)) são respectivamente, o teor de umidade da monocamada e a constante de energia. Entretanto, esse modelo se aplica a uma faixa de a_w de 0 a 0,55. Acima deste valor, o modelo resulta em uma variação não-linear muito grande quando se analisa graficamente a equação e passa a ser bem representado pelo modelo de GAB.

4.7. REFERÊNCIAS

- ABCS. Associação Brasileira dos criadores de suínos. **Brasileiros tem aumentado o consumo per capita de carne suína**. Disponível em: ><https://abcs.org.br/noticia/brasileiros-tem-aumentado-o-consumo-per-capita-de-carne-suina/><. Acesso em: 10 jan. 2022.
- ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual**. 2020. Disponível em: <https://abpa-br.org/abpa-lanca-relatorio-anual-2020/> . Acesso em: 27 jul. 2020.
- ALAMATIAN, S.; MOHEBBI, M.; VARIDI, M.; NEZHAD, M. M. Modeling of osmotic treatment of ostrich meat coated by tragacanth and salep. **Meat science**, v. 156, p. 231-239, 2019.
- ALARCON-ROJO, A. D.; CARRILLO-LOPEZ, L. M.; REYES-VILLAGRANA, R.; HUERTA-JIMÉNEZ, M.; GARCIA-GALICIA, I. A. Ultrasound and meat quality: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 55, p. 369-382, 2019.
- ALARCON-ROJO, A. D.; JANACUA, H.; RODRIGUEZ, J. C.; PANIWNKY, L.; MASON, T. J. Power ultrasound in meat processing. **Meat science**, v. 107, p. 86-93, 2015.
- ALBARRACÍN, W.; SÁNCHEZ, I.C.; GRAU, R.; BARAT, J.M. Salt in food processing; usage and reduction: a review. **International Journal of Food Science and Technology**, v.46, n. 7, p. 1329–1336, 2011.
- AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and bioproducts processing**, v. 80, n. 2, p. 118-128, 2002.
- ALVES, L. L.; SILVA, M. S.; FLORES, D. R. M.; ATHAYDE, D. R.; RUVIARO, A. R.; BRUM, D. S.; BATISTA, V. S. F.; MELLO, R. O.; MENEZES, C. R.; CAMPAGNOL, P. C. B.; WAGNER, R.; BARIN, J. S.; CICHOSKI, A. J. Effect of ultrasound on the physicochemical and microbiological characteristics of Italian salami. **Food Research International**, v. 106, p. 363-373, 2018.
- AMIRI, A.; SHARIFIAN, P.; SOLTANIZADEH, N. Application of ultrasound treatment for improving the physicochemical, functional and rheological properties of myofibrillar proteins. **International journal of biological macromolecules**, v. 111, p. 139-147, 2018.

AYKIN, E.; ERBAŞ, M. Quality properties and adsorption behavior of freeze-dried beef meat from the Biceps femoris and Semimembranosus muscles. **Meat science**, v. 121, p. 272-277, 2016.

AYKIN-DİNÇER, E. Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. **Meat Science**, v. 176, p. 108469, 2021.

AYKIN-DİNÇER, E.; ERBAŞ, M. Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat science**, v. 145, p. 114-120, 2018.

AZUARA, E.; CORTES, R.; GARCIA, H.; BERISTAIN, C.I. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second Law. **International Journal of Food Science and Technology**, v.27, n. 4, p. 409- 418, 1992.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA, A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. John Wiley & Sons, 2020, p. 615.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA, J. A.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**, Ames: Blackwell Publishing Profesional, 2007, p. 438.

BARRETTO, T. L.; POLONIO, M. A. R.; TELIS-ROMERO, J.; BARRETTO, A. C. S. Improving sensory acceptance and physicochemical properties by ultrasound application to restructured cooked ham with salt (NaCl) reduction. **Meat Science**, v. 145, p. 55-62, 2018a.

BARRETTO, T. L.; POLACHINI, T. C.; BARRETTO, A. C. D. S.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption isotherms of cooked hams as affected by temperature and chemical composition. **Food Science and Technology**, v. 39, n. 3, p. 677-683, 2018b.

BARRETTO, T. L.; SANCHES, M. A. R.; PATEIRO, M.; LORENZO, J. M.; TELIS-ROMERO, J.; BARRETTO, A. C. S.. Recent advances in the application of ultrasound to meat and meat products: Physicochemical and sensory aspects. **Food Reviews International**, v. n/a, p. 1-16, 2022.

BECKER, H. A. A study of desorption isotherms of wheat at 25°C and 50°C. **Cereal chemistry**, v. 33, p. 79-91, 1956.

BERLAN, J.; MASON, T. J. Sonochemistry: from research laboratories to industrial plants. **Ultrasonics**, v. 30, n. 4, p. 203-212, 1992.

BETIOL, L. F. L.; EVANGELISTA, R. R.; SANCHES, M. A. R.; BASSO, R. C.; GULLÓN, B.; LORENZO, J. M.; BARRETTO, A. C. S.; ROMERO, J. T. Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT - Food Science and Technology**, v. 123, p. 109112, 2020.

BOGOEVA, A. L.; DURAKOVA, A. G. Sorption characteristics of full-fatted grape seeds flour of Bulgarian origin. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 2, p. 100026, 2020.

BOQUET, R.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: II. Evaluation of various two-parameter models. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 13, n. 4, p. 319-327, 1978.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical society**, v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940.

BRUNAUER, S.; EMMET, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CÁRCEL, J. A.; BENEDITO, J.; BON, J.; MULET, A. High intensity ultrasound effects on meat brining. **Meat Science**, v. 76, n. 4, p. 611-619, 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**, v. 110, n. 2, p. 200-207, 2012.

CARDENAS, F.J.C.; OLIVERA, D. F. Texture Changes in Meat during Storage. **Reference Module in Food Science**, v.1, p. 1-5, 2016.

CHARCUTARIA, 2022. Disponível em: ><https://charcutaria.org/sal/guia-de-preservacao-da-carne/><. Acesso em: 02 de outubro de 2022.

CHEMAT, F.; ASHOKKUMAR, M. Preface: Ultrasound in the processing of liquid foods, beverages and alcoholic drinks. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 38, p. 753, 2017.

CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M. K. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 18, n. 4, p. 813-835, 2011.

CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for Fitting Water Sorption Isotherm of Foods: Part I: A Review. **Journal Food Technology**, v.13, n. 1, p. 159-174, 1978.

CICHOSKI, A. J.; RAMPELOTTO, C.; SILVA, M. S.; MOURA, H. C.; TERRA, N. N.; WAGNER, R.; MENEZES, C. R.; FLORES, E. M. M.; BARIN, J. S. Ultrasound-assisted post-packaging pasteurization of sausages. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 30, p. 132-137, 2015.

CICHOSKI, A. J.; SILVA, M. S.; LEÃES, Y. S. V.; BRASIL, C. C. B.; MENEZES, C. R.; BARIN, J. S.; WAGNER, R.; CAMPAGNOL, P. C. B. A promising technology to improve the technological quality of meat emulsions. **Meat science**, v. 148, p. 150-155, 2019.

CRANK, J. **The mathematics of Diffusion**. 2nd ed. Oxford: Claredon Press, 1975.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. Editora Blucher, 2016.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química De Alimentos De Fennema**. Editorial Acibia, Espanha, 2010.

DELGADO, A. E.; SUN, D. W. Desorption isotherms and glass transition temperature for chicken meat. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 1, p. 1-8, 2002b.

DOLATOWSKI, Z. J.; STADNIK, J.; STASIAK, D. Applications of ultrasound in food technology. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 6, n. 3, p. 88-99, 2007.

ERBAŞ, M.; AYKIN, E.; ARSLAN, S.; DURAK, A. N. Adsorption behavior of bulgur. **Food Chemistry**, v. 195, p. 87–90, 2016.

FERRENTINO, G.; SPILIMBERGO, S. A combined high pressure carbon dioxide and high power ultrasound treatment for the microbial stabilization of cooked ham. **Journal of Food Engineering**, v. 174, p. 47 -55, 2016.

FRAQUEZA, M. J.; BORGES, A.; PATARATA, L. Strategies to reduce the formation of carcinogenic chemicals in dry cured meat products. **Food Control and Biosecurity**, p. 295-342, 2018.

FRAQUEZA, M. J.; PATARATA, L. Fermented meat products: From the technology to the quality control. **Fermented food products**, v.1, p. 197-238, 2019.

FREITAS, M. L. F.; POLACHINI, T. C.; DE SOUZA, A. C.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated Parmesan cheese. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 250-259, 2016.

GAULT, N. F. S. The relationship between water-holding capacity and cooked meat tenderness in some beef muscles as influenced by acidic conditions below the ultimate pH. **Meat Science**, v. 15, p. 15-50, 1985.

GÓMEZ-SALAZAR, J. A.; OCHOA-MONTES, D. A.; CERÓN-GARCÍA, A.; OZUNA, C.; SOSA-MORALES, M. E. Effect of acid marination assisted by power ultrasound on the quality of rabbit meat. **Journal Food Quality**, v. 2018, p. 1-6, 2018.

GRACIA, A.; MAGISTRIS, T. Preferences for lamb meat: A choice experiment for Spanish consumers. **Meat Science**, v. 95, p. 396-402, 2013.

HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **The Journal of Chemical Physics**, v. 16, n. 10, p. 931–937, 1948.

HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. Handbook of Food Engineering, Marcel Dekker, Inc.: New York, 1992.

HUGHES, J. M.; OISETH, S. K.; PURSLOW, P. P.; WARNER R. D. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. **Meat science**, v. 98, n. 3, p. 520-532, 2014.

IACUMIN, L.; CATTANEO, P.; ZUCCOLO, C.; GALANETTO, S.; ACQUAFREDDA, A.; COMI, G. Natural levels of nitrites and nitrates in San Daniele dry cured ham PDO, and in meat, salt and sugna used for its production. **Food Control**, v. 100, p. 257-261, 2019.

IGLESIAS, HÉCTOR A.; CHRIFE, J. **Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components**. Imprensa Académica, 1982.

KANG, D. C.; WANG, A. R.; ZHOU, G. H.; ZHANG, W. G.; XU, S. M.; GUO, G. P. Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and NaCl concentration. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 35, p. 36-44, 2016.

KASAAI, M. R. Input power-mechanism relationship for ultrasonic irradiation: Food and polymer applications, **Natural Science**, v. 5, n. 8A2, p. 14-22, 2013.

LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods: theoretical and practical aspects. **In: Theory, determination and control of physical properties of food materials**. Springer, Dordrecht, 1975, p. 197-219.

LABUZA, T. P. The properties of water in relationship to water binding in foods: a review ^{1,2}. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 1, n. 2, p. 167-190, 1977.

LABUZA, T. P.; TANNEMBAUM, S. R.; KAREL, M. Water content and stability of lowmoisture and intermediate-moisture foods. **Food Technology**. v. 24, p. 543-550, 1970.

LEE, J. H.; ALFORD, L.; KANNAN, G.; KOUAKOU, B. Curing properties of sodium nitrite in restructured goat meat (chevon) jerky. **International journal of food properties**, v. 20, n. 3, p. 526-537, 2017.

LEIGHTON, T.G. The sound field. **In: Leighton, T. G. The acoustic bubble**. Academic Press, New York, 1994, p. 1–66.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations part I: Fruit, vegetable and meat products. **LWT - Food Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 111–117, 1985.

LOPES-FILHO, J. F.; ROMANELLI, P. F.; BARBOZA, S. H. R.; GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms of alligator's meat (*Caiman crocodilus yacare*). **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 2, p. 201–206, 2002.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio Brasil 2018/2019 a 2028/2029** – Projeções de longo prazo, 2019. Disponível em: >https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas_publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do_agronegocio-2018-2019-2028-2029<. Acesso em: 29 de setembro de 2022.

MARTINS, M. G.; MARTINS, D. E. G.; PENA, R. DA S. Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 144–151, 2015.

MCDONNELL, C. K.; ALLEN, P.; MORIN, C.; LYNG, J. G. The effect of ultrasonic salting on protein and water-protein interactions in meat. **Food Chemistry**, v. 147, p. 245-251, 2014a.

MCDONNELL, C. K.; LYNG, J. G.; ARIMI, J. M.; ALLEN, P. The acceleration of pork curing by power ultrasound: A pilot-scale production. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 26, p. 191-198, 2014b.

MCDONNELL, C.K.; LYNG J.G.; ALLEN, P. The use of power ultrasound for accelerating the curing of pork. **Meat Science**, v. 98, n. 2, p. 142-149, 2014.

MILLER, M. F.; CARR, M. A.; RAMSEY, C. B.; CROCKETT, K. L.; HOOVER, L. C. Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness. **Journal of Animal Science**, v. 79, n. 12, p. 3062-3068, 2001.

MOLINA-FILHO, L.; PEDRO, M. A. M.; TELIS-ROMERO, J.; BARBOZA, S. H. R. Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*). **Food Science and Technology**, v. 26, p. 453-458, 2006.

NGAPO, T. M.; MARTIN, J. F.; DRANFIELD, E. International preferences for pork appearance: I. Consumer choices. **Food Quality and Preference**, v. 18, n. 1, p. 26-36, 2007.

OJHA, K. S.; KEENAN, D. F.; BRIGHT, A.; KERRY, J. P.; TIWARI, B. K. Ultrasound assisted diffusion of sodium salt replacer and effect on physicochemical properties of pork meat. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 37-45, 2016.

ORDÓÑEZ, J.A. Tecnologia de Alimentos. Porto Alegre: Artmed, 2005. p. 294.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life. III. The isotherm. **Journal of the Society of Chemical Industry**, v. 65, n. 12, p. 419-421, 1946.

OZUNA, C.; PUIG, A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; MULET, A., CÁRCEL, J. A. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 1, p. 84-93, 2013.

PACHECO, J.W.; YAMANAKA, H.T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno)**. São Paulo: CETESB, 2006.

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

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, v. 16, n. 1, p. 21-37, 1993.

PEÑA-GONZÁLEZ, E. M.; ALARCÓN-ROJO, A. D.; RENTERÍA, A.; GARCÍA, I.; SANTELLANO, E.; QUINTERO, A.; LUNA, L. Quality and sensory profile of ultrasound-treated beef. **Italian Journal Food Science**, v. 29, n. 3, p. 463-475, 2017.

PINTON, M. B.; CORREA, L. P.; FACCHI, M. M. X.; HECK, R., T.; LEÃES, Y, S. V.; CICHOSKI, A. J.; LORENZO, J. M.; SANTOS, M.; POLLONIO, M. A. R.;

CAMPAGNOL, P. C. B. Ultrasound: A new approach to reduce phosphate content of meat emulsions. **Meat Science**, v. 152, p. 88-95, 2019.

REYNOLDS, J. B.; ANDERSON, D. B.; SCHMIDT, G. R.; THENO, D. M.; SIEGEL, D. G. Effects of ultrasonic treatment on binding strength in cured ham rolls. **Journal of Food Science**, v. 43, n. 3, p. 866-869, 1978.

RIVERA, N.; BUNNING, M.; MARTIN, J. Uncured-labeled meat products produced using plant-derived nitrates and nitrites: Chemistry, safety, and regulatory considerations. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 29, p. 8074-8084, 2019.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. *In*: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. **Engineering Properties of Foods**. 3ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. p. 1-88.

ROSA, D. P.; EVANGELISTA, R. R.; MACHADO, A. L. B.; SANCHES, M. A. R.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. **LWT - Food Science and Technology**, v. 138, p. 110458, 2021.

ROSA, D. P.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J. Study of the enthalpy-entropy mechanism from water sorption of orange seeds (*C. sinensis* cv. *Brazilian*) for the use of agro-industrial residues as a possible source of vegetable oil production. **Food Science and Technology**, v. 33, n.1, p. 95-101, 2013.

SALDAÑA, E.; CASTILLO, L. S.; SÁNCHEZ, J. C.; SICHE, R.; DE ALMEIDA, M. A.; BEHRENS, J. H.; SELANI, M. M.; CONTRERAS-CASTILLO, C. J. Descriptive analysis of bacon smoked with Brazilian woods from reforestation: methodological aspects, statistical analysis, and study of sensory characteristics. **Meat Science**, v. 140, p. 44-50, 2018.

SANCHES, M. A. R.; SILVA, P. M. O. C.; BARRETTO, T. L.; DARROS-BARBOSA, R.; DA SILVA-BARRETTO, A. C.; TELIS-ROMERO, J. Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound. **LWT**, v. 149, p. 112036, 2021.

SANCHEZ-TORRES, E. A.; ABRIL, B.; BENEDITO, J.; BON, J.; GARCIA-PEREZ, J. V. Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. **LWT - Food Science and Technology**, v. 149, p. 111857, 2021.

SARCINELLI, M. F.; VENTURINI, K. S.; SILVA, L.C. **Processamento da Carne Suína**. Espírito Santo: Pró-Reitoria de Extensão -Programa Institucional de Extensão. (Boletim Técnico -PIE-UFES:01907 -Editado: 14.10.2007), 2007.

SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 553-559, 2009.

SHARMA, N.; GOYAL, S. K.; ALAM, T.; FATMA, S.; NIRANJAN, K. Effect of Germination on the Functional and Moisture Sorption Properties of High-Pressure-

Processed Foxtail Millet Grain Flour. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 1, p. 209-222, 2018.

SIKES, A. L.; MAWSON, R.; STARK, J.; WARNER, R. Quality properties of pre- and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 6, p. 2138-2143, 2014.

SILVA, K. S.; POLACHINI, T. C.; LUNA-FLORES, M.; LUNA-SOLANO, G.; RESENDE, O.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 9, p. e13784, 2021.

SINGH, R. R. B.; RAO, K. H.; ANJANEYULU, A. S. R.; PATIL, G. R. Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. **Journal of food engineering**, v. 75, n. 2, p. 228-236, 2006.

SIRÓ, I.; VÉN, C. S.; BALLA, C.S.; JÓNÁS, 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**, v. 91, n. 2, p. 353–362, 2009.

SORMOLI, E. M.; LANGRISH, T. A. G. Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. **LWT – Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 875–882, 2015.

STADNIK, J.; DOLATOWSKI, Z.J. Influence of sonication on Warner–Bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (*m. semimembranosus*). **European Food Research and Technology**, v. 233, n. 4, p. 553 -559, 2011.

STADNIK, J.; DOLATOWSKI, Z.J.; BARANOWSKA, H.M. Effect of ultrasound treatment on water holding properties and microstructure of beef (*m. semimembranosus*) during ageing. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 10, p. 2151-2158, 2008.

STAUDT, P. B.; TESSARO, I. C.; MARCZAK, L. D. F.; SOARES, R. D. P.; CARDOZO, N. S. M. A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. **Journal of Food Engineering**, v. 118, n. 3, p. 247-255, 2013.

SUINOCULTURA. **Avaliação da cor em produtos cárneos**. Disponível em: > https://www.suinoculturaindustrial.com.br/imprensa/avaliacao-da-cor-em-produtos-carneiros/20111005-072712-t843#:~:text=Os%20valores%20L*%20medem%20da,altos%20indicando%20carne%20mais%20p%C3%A1lida. < Acesso em: 20 set. 2022.

SWATLAND, H. J. Meat products and consumption culture in the West. **Meat Science**, v. 86, n. 1, p.80-85, 2010.

TOLDRÁ, F. **Lawrie's meat science**. Cambridge: Woodhead Publishing, 8ed, 2017, p. 714.

TOLDRÁ, F.; FLORES, M. The use of muscle enzymes as predictors of pork meat quality. **Food Chemistry**, v. 69, n. 4, p. 387-395, 2000.

TONON, R. V.; BARONI, A. F.; BRABET, C.; GIBERT, O.; PALLET, D.; HUBINGER, M. D. Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea Mart.*) juice. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 3-4, p. 215-221, 2009.

USDA. **United States Department of Agriculture. Livestock and Poultry: World Markets and trades.** Foreign Agricultural Service, 2019. Disponível em: >https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf< Acesso em: 20 set. 2022.

VIMINI, R.J.; KEMP, J.D.; FOX, J.D. Effects of low frequency ultrasound on properties of restructured beef rolls. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 5, p. 1572-1573, 1983.

WÓJCIAK, K. M.; STASIAK, D. M.; FERYSIUK, K.; SOLSKA, E. The influence of sonication on the oxidative stability and nutritional value of organic dry-fermented beef. **Meat Science**, v. 148, p. 113-119, 2019.

YEUNG, C.K.; HUANG, S.C. Effects of ultrasound pretreatment and ageing processing on quality and tenderness of pork loin. **Journal Food Nutrition Research**, v. 5, n. 11, p. 809-816, 2017.

ZOU, Y.; ZHANG, W.; KANG, D.; ZHOU, G. Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking. **International Journal Food Science Technology**, v. 53, n. 3, p. 828-836, 2018.

5 CAPÍTULO II - “Efeito da umidade e concentração de NaCl nas propriedades físicas de barriga suína no processo de produção de bacon”

Bruna Grassetti Fonseca¹, Marcio Augusto Ribeiro Sanches¹, Tiago Carregari Polachini¹ e Javier Telis-Romero¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA)

Publicado como Capítulo de Livro em: *Nutrição, Análise e Controle de Qualidade de Alimentos 2, Capítulo 18, p. 190-201.*

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi determinar a espessura da barriga suína a partir de relação experimental volume e a área, e modelar matematicamente em função dos teores de umidade e NaCl durante a salga úmida. O processo de salga úmida foi realizado em oito diferentes tempos (2, 4, 6, 8, 11, 14, 17 e 19 horas) em temperatura controlada de $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para avaliar o efeito dos teores de umidade e de NaCl sobre o volume, a área e a espessura da barriga suína, a redução do teor de umidade foi realizada em seis tempos pré-programados (0,2; 1,1; 2; 2,5; 3,3; 4 horas) totalizando, desta forma, seis conteúdos de água distintos para cada tempo de salga. O teor de umidade das amostras de barriga suína diminuiu na medida em que se incorporou sal e durante a sua secagem. Como resultado, a concentração de sal aumentou na medida em que a umidade diminuiu. Embora o volume tenha sido afetado pela concentração de sal, a área superficial das amostras manteve-se constante em todas as condições, ao contrário da espessura que sofreu uma redução na medida em que aumentou-se a concentração de NaCl. O volume e a espessura puderam ser representados por modelos lineares em função das variáveis significativas, podendo ser utilizados para fins preditivos.

Palavras-chave: Volume; área; espessura; salga; modelagem.

ABSTRACT: The objective of this work was to determine the thickness of the swine belly based on an experimental relationship between volume and area, and to model mathematically according to the moisture and NaCl contents during wet salting. The wet salting process was carried out at eight different times (2, 4, 6, 8, 11, 14, 17 and 19 hours) at a controlled temperature of $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. To evaluate the effect of moisture and NaCl contents on the volume, area and thickness of the swine belly, the water content reduction was performed in six pre-programmed times (0.2; 1.1; 2; 2, 5, 3,3; 4 hours), thus totaling six different water contents for each salting time. The moisture content of the swine belly samples decreases as salt is incorporated and during drying. As a result, the salt concentration increased as the humidity decreased. Although the volume was affected by the salt concentration, the surface area of the samples remained constant in all conditions, in contrast to the thickness that suffered a reduction as the concentration of NaCl increased. The volume and thickness could be represented by linear models as a function of significant variables, and can be used for predictive purposes.

Keywords: *Volume; area; thickness; salting; modeling.*

5.1. Introdução

O bacon é um produto cárneo produzido a partir de carne suína, do ventre, é curado e desidratado com ou sem fumaça de madeira. Apresenta uma ampla utilização culinária para diferentes pratos como em café da manhã, acompanhamentos, sanduíches, saladas entre outros, o que o torna um produto com alta demanda e muito popular a nível mundial (Soladoye et al., 2015).

A difusão é o processo pelo qual a matéria é transportada de uma parte de um sistema a outra como resultado de movimentos aleatórios de moléculas (Crank, 1975). Em alimentos sólidos, o transporte de massa ocorre principalmente pelo processo de difusão molecular, não existindo transporte de massa por convecção. Com estas considerações e supondo que a difusividade, D_{AB} , é constante, chega-se a equação de Difusão de Fick:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (1)$$

Em que C_A é a concentração do componente A, D_{AB} é a difusividade do componente A através do componente B, t é o tempo e $\nabla^2 C_A$ é o laplaciano da concentração.

A solução analítica desenvolvida por Crank (1975) para placa plana infinita, transferência de massa unidirecional, concentração da solução circundante constante e resistência externa à transferência de massa desprezível, pode ser escrita como:

$$\frac{C_{Ao} - C_{At}}{C_{Ao} - C_{A\infty}} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{D_{ef} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}} \quad (2)$$

Em que C_{Ao} é a concentração inicial, C_{At} é a concentração no tempo t , $C_{A\infty}$ é a concentração no equilíbrio D_{ef} é a difusividade efetiva do componente A através do componente B e L é a medida da espessura.

A barriga de porco é composta por vários músculos contendo gordura entre eles (Soladoye et al., 2015), o que o faz diferente do lombo de porco, que é constituído por apenas um músculo, o *longissimus dorsi* (LD). Além disso, as camadas musculares e gorduras se sobrepõem ao longo da barriga, porque os músculos que compõem a barriga do porco diferem consideravelmente, dependendo de sua localização anatômica no corte (Trusell al., 2011). Assim, a estimativa da espessura em toda a barriga é geralmente bastante complicada de se obter (Lee al., 2018) sendo necessária para estimar os coeficientes de difusão de NaCl e água no processamento de salga da barriga suína para a produção industrial de bacon.

A espessura média da barriga de porco pode ser determinada utilizando um micrometro, entretanto sempre há uma série de imperfeições nos cortes, gerando uma estimativa que pode não representar toda a amostra. Outra maneira de se determinar a espessura média da barriga suína, pode ser utilizado a relação experimental entre o volume e a área da amostra.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar a espessura da barriga suína a partir de relação experimental volume e a área, e modelar matematicamente em função dos teores de umidade e NaCl durante a salga úmida.

5.2. Material e métodos

5.2.1. Matéria-Prima

As barrigas de porco foram adquiridas em comércio local, situado no município de São Jose do Rio Preto (SP/Brasil). O excesso de gordura foi removido para posterior armazenamento das carnes em freezer doméstico (-18 ± 2 °C) até posterior uso.

5.2.2. Composição da barriga suína

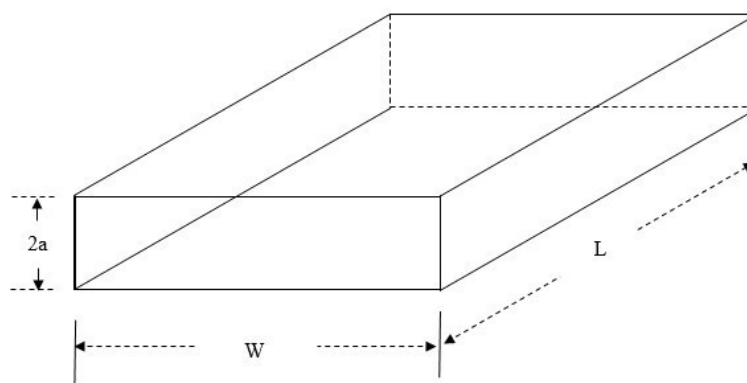
Para a quantificação da composição centesimal da barriga suína, as amostras foram descongeladas em refrigerador (1°C) por 48 h, em seguida, foram trituradas em um moedor de carne (Marca WMF, Modelo WMF037AI).

A composição química das amostras foi realizada em sete repetições, de acordo com os procedimentos recomendados pela *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC, 2007). A umidade (método 950.46) foi quantificada pelo método gravimétrico, baseado na remoção de água por aquecimento até peso constante. O teor de proteínas (método 981.10) foi determinado através do método de Kjeldahl. O conteúdo de lipídeos foi determinado pelo método de extração por solvente a frio proposto por Bligh e Dyer (1959) e o conteúdo de cinzas (método 920.153) foi determinado por incineração em mufla.

5.2.3. Preparação das amostras e da salmoura

Previamente ao processo de salga úmida, as amostras foram descongeladas por 48 horas a 1°C para serem cortadas em formatos comumente encontrados durante o processamento do bacon. As amostras obtiveram a geometria de paralelepípedo (Figura 5.1), com as dimensões de $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2,4\text{ cm}$ (largura (W) $\times$ comprimento (L) $\times$ espessura (2a)).

Figura 5.1- Formato aproximado das amostras de barriga suína.



Para preparação da salmoura, foram adicionados 260 g de cloreto de sódio (NaCl) em 1 L de água destilada. A mistura foi homogeneizada em agitador magnético até completa dissolução do sal.

5.2.4. Salga úmida

O processo de salga úmida foi realizado em um recipiente de 30 cm × 30 cm × 5 cm (largura × comprimento × altura). O recipiente foi imerso em um banho termostático com temperatura controlada em 5 ± 1 °C. Após completa imersão das amostras de barriga suína, o processo de salga foi conduzido em oito diferentes tempos (2, 4, 6, 8, 11, 14, 17 e 19 horas). Finalizadas as salgas, as amostras foram retiradas da salmoura e submetidas às determinações analíticas e medidas físicas.

5.2.5. Determinações analíticas

Para avaliar o efeito do teor de umidade e de NaCl na espessura da barriga suína, as amostras foram submetidas a secagem em estufa de circulação forçada (modelo MA 033/216, Marconi, Brasil) a 60 °C. As amostras foram dispostas em bandejas de alumínio perfuradas e retiradas em intervalos de tempo pré-estabelecidos de secagem (0,2; 1,1; 2; 2,5; 3,3 e 4 horas), originando produtos com seis umidades distintas (X_a) para cada tempo de salga. A umidade inicial das amostras foi calculado através da diferença de peso entre a amostra final e amostra inicial, com base na umidade inicial.

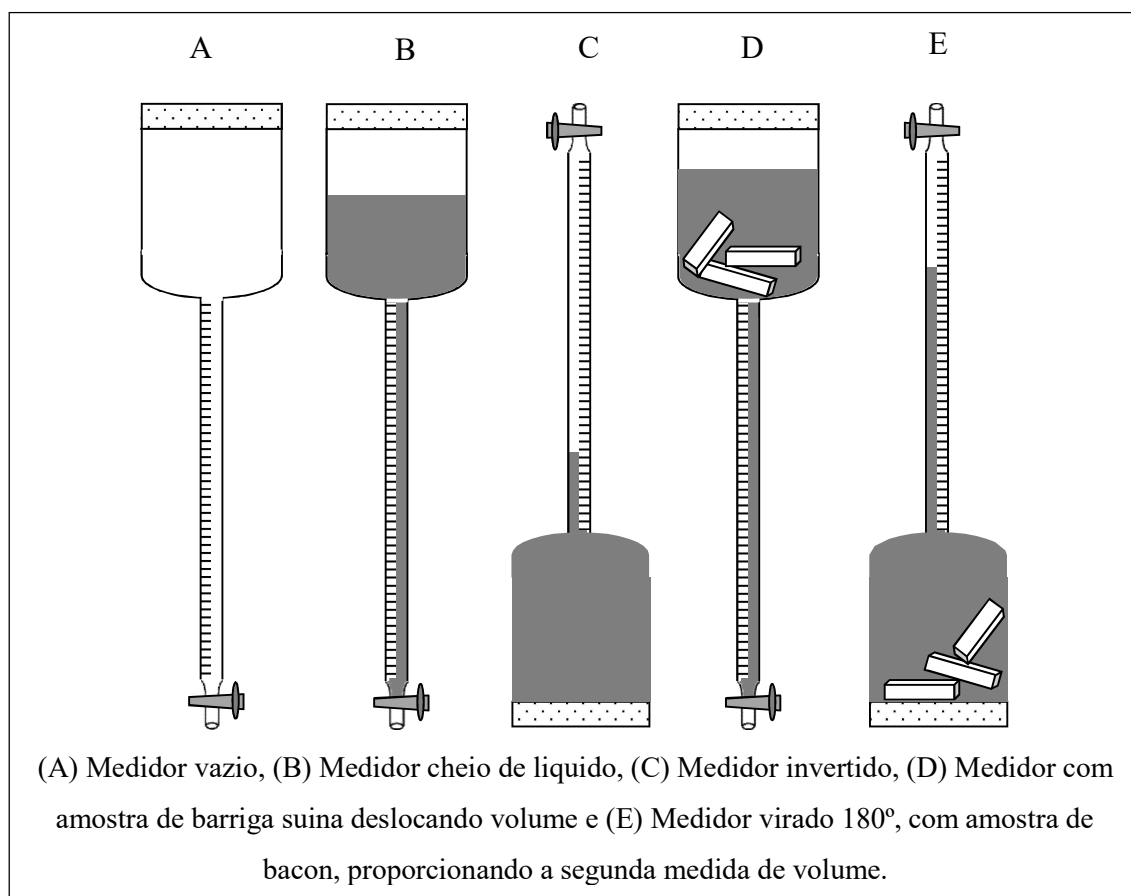
O teor de umidade inicial das amostras, previamente à secagem, foi determinado em estufa a 105 °C por 4 horas de acordo com o método proposto por AOAC (2007). O teor de NaCl nessas amostras (X_s) foi determinado pela quantificação de cloretos de acordo com o método de Möhr (AOAC, 2007).

5.2.6. Propriedades físicas da barriga suína

5.2.6.1. Determinação do volume (V)

Para determinação do volume das amostras, foi utilizado o método de deslocamento de fluido. Para isso, utilizou-se um aparelho semelhante ao utilizado por Gabas et al. (2005) mostrado na Figura 5.2. Por ser menos densa que as amostras, a água foi utilizada como meio líquido para imersão das amostras. Após inserção das amostras da barriga suína em um compartimento (Becker de vidro - A) de 1000 mL, a tampa (confeccionada em vinil - B) foi fechada tornando o compartimento hermético.

Figura 5.2 - Aparelho experimental utilizado para determinação do volume das amostras.



O aparelho é preenchido com uma porção adequada de líquido e invertido para realização do deslocamento de volume em bureta graduada (C) com precisão de 0,05 mL e capacidade de 100 mL. Este aparelho foi previamente calibrado com cilindros de cobre e de alumínio com massas, volumes e densidades conhecidas ($\rho_{\text{cobre}}=8,96 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{\text{alumínio}}=2,70 \text{ g/cm}^3$).

5.2.6.2. Determinação da área (A)

A área (A; cm²) das amostras de barriga suína foi determinada pela relação de área/massa de folhas de papel sulfite. Para isso, a massa por área de papel sulfite branco foi determinada para 11 folhas de papel sulfite branco como apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Medidas de massa e área de uma folha de papel sulfite.

Folha	Massa (gramas)	Área (cm ²)
1	4,692	623,7
2	4,691	623,7
3	4,692	623,7
4	4,691	623,7
5	4,692	623,7
6	4,692	623,7
7	4,691	623,7
8	4,692	623,7
9	4,691	623,7
10	4,689	623,7
11	4,689	623,7
Média	4,692	623,7

Através da relação da massa média sobre área média da folha de sulfite, tem-se o valor de $7,523 \times 10^{-3}$ g de papel sulfite/cm². Sendo assim, as amostras de barriga suína foram colocadas sobre uma folha de sulfite branco durante 5 segundos. A marcação causada pela barriga suína na folha foi recortada cuidadosamente, sendo seca em estufa (Marca Marconi, Modelo MA 033/216) até peso constante. Após obtida a massa de papel recortada [M_0 , em gramas] referente a amostra de barriga suína, sua área pôde ser obtida usando a Equação (3):

$$A = \frac{[M_0]}{7,523 \times 10^{-3}} \quad (3)$$

5.2.6.3. Determinação da espessura

A espessura das amostras de barriga suína foi determinada através dos dados anteriormente obtidos para volume (cm³) e área (cm²). Para isso, foi utilizada a Equação (4), apresentada a seguir:

$$\text{Espessura} = 2a = \frac{V_{\text{experimental}}}{A_{\text{experimental}}} \quad (4)$$

onde $V_{\text{experimental}}$ e $A_{\text{experimental}}$ são respectivamente o volume (cm^3) e a área (cm^2) determinados experimentalmente.

5.2.6.4. Modelagem matemática

A fim de avaliar o efeito da umidade e teor de NaCl sobre a espessura das amostras de barriga suína, um modelo genérico que contempla os efeitos de primeira e segunda ordem foi utilizado ajustado de modo a obter uma equação matemática que descreve a espessura como função das variáveis significativas. A Equação (5) apresenta a forma genérica de um polinômio de segundo grau com a interação linear das variáveis independentes estudadas:

$$\delta(X_a, X_s) = \beta_0 + \beta_1 X_a + \beta_2 X_s + \beta_3 X_a^2 + \beta_4 X_s^2 + \beta_5 X_a X_s \quad (5)$$

onde $\delta(X_a, X_s)$ representa as variáveis independentes (volume (cm^3); área (cm^2) e espessura $2a$ (cm)) da barriga suína em função da umidade final (X_a), em g de água/g de barriga suína, e conteúdo de NaCl (X_s), em g de NaCl/g de barriga suína, e β_{1-5} as constantes empíricas do modelo.

Os dados de espessura foram submetidos inicialmente à uma análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito significativo dos termos lineares e quadráticos para prever as propriedades físicas da barriga suína. Os termos com influência significativa a 95% de confiança sobre os dados determinados foram utilizados para construir um modelo baseado na Equação (5). A avaliação da qualidade do ajuste foi realizada com base no coeficiente de determinação ajustado (R^2) e pela raiz quadrada do erro médio ($RQEM$), Equação (6).

$$RQEM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (y_{\text{experimental}} - y_{\text{predito}})^2} \quad (6)$$

onde n representa o número de pontos experimentais, $y_{\text{experimental}}$ é valor determinado experimentalmente e y_{predito} é o valor predito pelo modelo matemático.

5.3. Resultados e discussão

A Tabela 5.2 apresenta os resultados da composição química da barriga suína.

Tabela 5.2 - Composição química da barriga suína.

Componente (%)	Valores*
Água	54,027 ± 1,448
Proteína	18,334 ± 1,250
Lipídeos	24,137 ± 0,559
Cinzas	0,346 ± 0,342

*Média ± Desvio Padrão.

Após realização dos processos de salga úmida, foi determinado o volume (V), área (A) e espessura ($2a$) para as amostras de barriga suína nos diferentes tempos de secagem para cada salga. As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os dados experimentais de volume e área juntamente com a espessura determinada pela relação entre os dois anteriores.

Os dados apresentados mostram que, como esperado, a umidade das amostras diminui com o aumento do tempo de salga, provavelmente devido a maior pressão osmótica sobre a amostra, causando o aumento do fluxo hidrodinâmico (Dimakopoulou et al., 2019). Analogamente, o teor de NaCl incorporado pelas mesmas aumentou ao passo que a salga se prolongou.

Ao serem secadas, as amostras de barriga suína sofreram uma redução no seu teor de umidade. O aumento da concentração de NaCl, em base úmida, se deve às variações na umidade do produto durante a secagem.

Tabela 5.3 - Umidade e teor de NaCl, volume, área e espessura da barriga suína em diferentes tempos de secagem para cada processo de salga.

Tempo de secagem (h)	Umidade (g de água / g de amostra)	Teor de NaCl (g de NaCl/ g de amostra)	Volume (cm ³)	Área (cm ²)	Espessura (cm)
Tempo de salga 1 (2 horas)					
0,20	0,5066 ± 0,0007	0,0051 ± 0,0001	253,35 ± 0,880	99,790 ± 0,197	2,539 ± 0,008
1,10	0,4827 ± 0,0001	0,0073 ± 0,0001	252,16 ± 0,345	100,233 ± 0,179	2,516 ± 0,004
2,00	0,4591 ± 0,0003	0,0095 ± 0,0002	252,02 ± 1,185	100,021 ± 0,291	2,520 ± 0,011
2,50	0,4375 ± 0,0001	0,0117 ± 0,0001	256,17 ± 0,736	100,300 ± 0,101	2,554 ± 0,010
3,30	0,4153 ± 0,0010	0,0139 ± 0,0001	256,94 ± 2,280	100,878 ± 0,828	2,547 ± 0,013
4,00	0,3956 ± 0,0036	0,0161 ± 0,0002	256,75 ± 3,127	100,952 ± 0,503	2,543 ± 0,032
Tempo de salga 2 (4 horas)					

0,20	0,4938 ± 0,0002	0,0183 ± 0,0003	255,25 ± 0,920	100,714 ± 0,046	2,534 ± 0,008
1,10	0,4691 ± 0,0006	0,0205 ± 0,0002	253,44 ± 3,435	100,970 ± 1,088	2,510 ± 0,007
2,00	0,4448 ± 0,0014	0,0227 ± 0,0004	249,71 ± 0,980	100,068 ± 0,233	2,495 ± 0,013
2,50	0,4243 ± 0,0001	0,0249 ± 0,0001	251,62 ± 0,723	100,300 ± 0,101	2,509 ± 0,010
3,30	0,4022 ± 0,0007	0,0271 ± 0,0002	252,75 ± 1,855	100,929 ± 0,775	2,504 ± 0,010
4,00	0,3822 ± 0,0038	0,0293 ± 0,0003	252,28 ± 3,094	101,002 ± 0,590	2,498 ± 0,032
Tempo de salga 3 (6 horas)					
0,20	0,4787 ± 0,0008	0,0315 ± 0,0003	248,47 ± 1,713	100,481 ± 0,472	2,473 ± 0,008
1,10	0,4588 ± 0,0008	0,0337 ± 0,0034	236,96 ± 3,188	100,530 ± 0,921	2,357 ± 0,037
2,00	0,4307 ± 0,0068	0,0359 ± 0,0004	243,00 ± 8,157	99,839 ± 1,975	2,434 ± 0,072
2,50	0,4129 ± 0,0013	0,0381 ± 0,0005	248,88 ± 1,725	100,792 ± 0,132	2,469 ± 0,015
3,30	0,3883 ± 0,0025	0,0403 ± 0,0002	249,26 ± 2,884	100,849 ± 0,366	2,472 ± 0,023
4,00	0,3670 ± 0,0008	0,0425 ± 0,0001	244,55 ± 0,771	100,191 ± 0,131	2,441 ± 0,005
Tempo de salga 4 (8 horas)					
0,20	0,4591 ± 0,0064	0,0447 ± 0,0003	240,21 ± 4,303	99,937 ± 1,179	2,404 ± 0,054
1,10	0,4423 ± 0,0005	0,0469 ± 0,0004	243,95 ± 1,446	100,536 ± 0,722	2,427 ± 0,006
2,00	0,4215 ± 0,0007	0,0491 ± 0,0005	240,61 ± 0,836	99,790 ± 0,197	2,411 ± 0,008
2,50	0,3974 ± 0,0003	0,0513 ± 0,0005	239,52 ± 0,185	100,271 ± 0,170	2,389 ± 0,003
3,30	0,3675 ± 0,0055	0,0535 ± 0,0008	235,05 ± 4,304	99,429 ± 0,942	2,364 ± 0,048
4,00	0,3515 ± 0,0001	0,0557 ± 0,0009	236,36 ± 1,704	99,478 ± 0,571	2,376 ± 0,007

Analizadas as diferentes condições de umidade e concentração de NaCl comumente encontradas no processo de salga úmida de barriga suína, foi possível determinar as propriedades físicas das amostras em uma faixa de umidade de 0,5066–0,2963 g de água/g de barriga suína e concentração de NaCl de 0,0051–0,1085 g de NaCl/g de barriga suína.

Tabela 5.4 - Umidade e teor de NaCl, volume, área e espessura da barriga suína em diferentes tempos de secagem para cada processo de salga (continuação).

Tempo de secagem (h)	Umidade (g de água / g de amostra)	Teor de NaCl (g de NaCl/ g de amostra)	Volume (cm ³)	Área (cm ²)	Espessura (cm)
Tempo de salga 5 (11 horas)					
0,20	0,4532 ± 0,0009	0,0579 ± 0,0004	241,68 ± 2,145	100,878 ± 0,828	2,396 ± 0,013
1,10	0,4336 ± 0,0033	0,0601 ± 0,0005	240,78 ± 2,788	100,763 ± 0,624	2,390 ± 0,030
2,00	0,4066 ± 0,0003	0,0623 ± 0,0007	238,55 ± 1,613	100,503 ± 0,493	2,374 ± 0,008
2,50	0,3838 ± 0,0001	0,0645 ± 0,0006	240,35 ± 2,598	101,450 ± 1,241	2,369 ± 0,005
3,30	0,3595 ± 0,0058	0,0667 ± 0,0007	232,59 ± 7,808	99,839 ± 1,975	2,330 ± 0,069

4,00	$0,3378 \pm 0,0044$	$0,0689 \pm 0,0002$	$234,49 \pm 5,989$	$100,303 \pm 1,401$	$2,338 \pm 0,053$
Tempo de salga 6 (14 horas)					
0,20	$0,4394 \pm 0,0025$	$0,0711 \pm 0,0003$	$238,52 \pm 2,760$	$100,849 \pm 0,366$	$2,365 \pm 0,022$
1,10	$0,4178 \pm 0,0009$	$0,0733 \pm 0,0008$	$234,05 \pm 0,724$	$100,221 \pm 0,156$	$2,335 \pm 0,005$
2,00	$0,3867 \pm 0,0058$	$0,0755 \pm 0,0012$	$229,85 \pm 4,132$	$99,964 \pm 1,132$	$2,300 \pm 0,051$
2,50	$0,3690 \pm 0,0025$	$0,0777 \pm 0,0001$	$228,52 \pm 2,108$	$99,299 \pm 0,556$	$2,301 \pm 0,027$
3,30	$0,3496 \pm 0,0007$	$0,0799 \pm 0,0007$	$230,16 \pm 0,856$	$99,813 \pm 0,179$	$2,306 \pm 0,008$
4,00	$0,3218 \pm 0,0072$	$0,0821 \pm 0,0069$	$227,27 \pm 2,629$	$100,123 \pm 2,203$	$2,270 \pm 0,044$
Tempo de salga 7 (17 horas)					
0,20	$0,4185 \pm 0,0055$	$0,0843 \pm 0,0013$	$224,73 \pm 4,115$	$99,429 \pm 0,942$	$2,260 \pm 0,046$
1,10	$0,4023 \pm 0,0003$	$0,0865 \pm 0,0013$	$225,95 \pm 1,629$	$99,478 \pm 0,571$	$2,271 \pm 0,006$
2,00	$0,3813 \pm 0,0010$	$0,0887 \pm 0,0005$	$231,01 \pm 2,050$	$100,878 \pm 0,828$	$2,290 \pm 0,012$
2,50	$0,3615 \pm 0,0037$	$0,0909 \pm 0,0008$	$230,87 \pm 2,831$	$101,002 \pm 0,590$	$2,286 \pm 0,029$
3,30	$0,3344 \pm 0,0002$	$0,0931 \pm 0,0010$	$227,32 \pm 1,582$	$100,487 \pm 0,475$	$2,262 \pm 0,007$
4,00	$0,3120 \pm 0,0008$	$0,0953 \pm 0,0008$	$229,86 \pm 2,692$	$101,483 \pm 1,209$	$2,265 \pm 0,004$
Tempo de salga 8 (19 horas)					
0,20	$0,4084 \pm 0,0077$	$0,0975 \pm 0,0011$	$221,95 \pm 7,227$	$99,862 \pm 1,974$	$2,223 \pm 0,063$
1,10	$0,3881 \pm 0,0058$	$0,0997 \pm 0,0002$	$223,96 \pm 5,720$	$100,303 \pm 1,401$	$2,233 \pm 0,050$
2,00	$0,3676 \pm 0,0027$	$0,1019 \pm 0,0005$	$227,78 \pm 2,636$	$100,849 \pm 0,366$	$2,259 \pm 0,021$
2,50	$0,3452 \pm 0,0014$	$0,1041 \pm 0,0024$	$223,55 \pm 0,701$	$100,255 \pm 0,197$	$2,230 \pm 0,005$
3,30	$0,3151 \pm 0,0056$	$0,1063 \pm 0,0006$	$219,52 \pm 3,918$	$99,970 \pm 1,206$	$2,196 \pm 0,049$
4,00	$0,2963 \pm 0,0027$	$0,1085 \pm 0,0025$	$218,13 \pm 1,727$	$99,302 \pm 0,718$	$2,197 \pm 0,026$

O volume determinado por deslocamento de líquido variou entre as amostras de 218,13 à 256,94 cm³, com valores decrescente na medida em que se prolongou tanto a salga quanto a secagem. Com relação a área das amostras, a mesma se mostrou praticamente constante para todas as condições de salga e secagem (~100 cm²), dando indícios de que a redução no volume se deve à alterações na dimensão característica da espessura. Dessa forma, foi possível determinar valores de espessura variando entre 2,539 e 2,197 cm. Essas medidas acompanham a mesma tendência observada para a umidade, diminuindo na medida em que o tempo de salga e de secagem aumenta.

Com os dados obtidos, analisou-se a influência das variáveis independentes (X_a e X_s) sobre as propriedades físicas (volume, área e espessura da barriga suína). Pela análise de variância, o volume das amostras não foi afetado pela umidade mas pela concentração de NaCl. Este efeito, em nível linear, demonstrou que o volume diminui linearmente com o aumento da concentração de sal, ou seja, na medida em que a salga e/ou a secagem se prolonga.

Com relação a área superficial das amostras, um valor médio de 100,32 cm² foi obtido sem influência significativa das variáveis independentes a 95% de confiança. Dessa forma, pode-se dizer que a variação do volume se deve a alterações na espessura. Esta, por sua vez, mostrou linearmente dependente com o aumento de NaCl na barriga suína. Em outras palavras, as amostras de barriga suína tendem ficarem mais finas na medida em que se incorpora o sal e/ou que se retira umidade.

Tabela 5.5 - Parâmetros do ajuste da Equação (5) aos dados de volume, área e espessura das amostras de barriga suína em função da umidade e teor de NaCl.

Parâmetros da Eq. (6)	Propriedades físicas	
	Volume (cm ³)	Espessura (cm)
β_0	258,75	2,5751
β_1	-	-
β_2	-348,27	-3,4014
β_3	-	-
β_4	-	-
β_5	-	-
R^2	0,8665	0,90279
$RQEM$	0,3496	0,0028

Baseado nestes resultados, os parâmetros do ajuste do modelo genérico representado pela Equação (5) aos dados de volume e espessura estão apresentados na Tabela 5.5. Exceto pela área, que demonstrou-se constante para a faixa de umidade e teor de NaCl, o ajuste aos dados de volume e espessura apresentaram boa precisão ($R^2 > 0,8665$). Além disso, os valores de $RQEM$ comparado com a média dos valores de volume e espessura representam resíduos menores que 0,15%. Portanto, as equações obtidos podem ser utilizadas adequadamente para prever o encolhimento de amostras de barriga suína durante os processos de desidratação osmótica e secagem. Tais dados são úteis a fim de estimar corretamente os coeficientes de difusão de sal e água em amostras de barriga suína, quando submetidas ao processo de produção de bacon.

5.4. Conclusão

O teor de umidade das amostras de barriga suína diminuiu na medida em que se incorporou sal e durante a sua secagem. Como resultado, a concentração de sal aumentou na medida em que a umidade diminuiu.

Embora o volume tenha sido afetado pela concentração de sal, a área superficial das amostras manteve-se constante em todas as condições, ao contrário da espessura que sofreu uma redução na medida em que aumentou-se a concentração de NaCl.

O volume e a espessura puderam ser representados por modelos lineares em função das variáveis significativas a 95%. Por apresentarem boa precisão, eles podem ser utilizados tanto na predição de propriedades físicas de barriga suína, mas também para estimar os coeficientes de difusão de sal e água nas amostras. A determinação mais precisa dos coeficientes de difusão permitem melhor projeto das operações de transferência de massa envolvidas na produção de bacon.

5.5. Referências

- AOAC (2007). **Association of Official Analytical Chemists**, 17th ed., p. 2, Official Methods of Analysis of AOAC Internacional, Gaithersburg.
- AYKIN-DINÇER, Elif; ERBAŞ, Mustafa. Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat science**, v. 145, p. 114-120, 2018.
- BLIGH, E. G., & DYER, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian journal of biochemistry and physiology**, 37 (8), 911-917.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, 414 p. 1975.
- GABAS, A. L., MARRA-JÚNIOR, W. D., TELIS-ROMERO, J., & TELIS, V. R. N. (2005). Changes of density, thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of plums during drying. **International journal of food properties**, 8(2), 233-242.
- Lee, E. A., Kang, J. H., Cheong, J. H., Koh, K. C., Jeon, W. M., Choe, J. H., ... & Kim, J. M. (2018). Evaluation of whole pork belly qualitative and quantitative properties using selective belly muscle parameters. **Meat science**, 137, 92-97.
- SOLADOYE, P. O., SHAND, P. J., AALHUS, J. L., GARIÉPY, C., & JUÁREZ, M. (2015). Pork belly quality, bacon properties and recent consumer trends. **Canadian journal of animal science**, 95 (3), 325-340.
- TRUSELL, K. A., APPLE, J. K., YANCEY, J. W., JOHNSON, T. M., GALLOWAY, D. L., & STACKHOUSE, R. J. (2011). Compositional and instrumental firmness variations within fresh pork bellies. **Meat science**, 88(3), 472-480.

6 CAPÍTULO III - “Estudo comparativo do efeito da agitação mecânica e aplicação de ultrassom na difusão de sal durante a salga de barriga suína”

Bruna Grassetti Fonseca¹, Marcio Augusto Ribeiro Sanches¹, Maria Júlia Neves Martins¹,
Micael José de Almeida¹, Tiago Carregari Polachini¹ e Javier Telis-Romero¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Instituto de
Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Departamento de Engenharia e
Tecnologia de Alimentos (DETA)

Artigo a ser submetido à Revista: *Meat Science*, 2023.

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar e comparar o impacto da salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre a perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e conteúdo de sal (SC) durante a salga úmida de barriga suína. O estudo também avaliou a aplicabilidade de modelos matemáticos para simular a WL, SG e SC durante o processo. As amostras de carne foram imersas em salmouras saturadas com NaCl em diferentes temperaturas (1, 5, 10 e 15 °C). Três tratamentos foram testados: SB, AG e US. A WL, SG e SC foram significativamente afetados por US e por AG, em comparação ao SB. Houve uma maior ($P < 0,05$) WL, SG e SC para o tratamento US. Entretanto, o tratamento AG apresentou uma maior ($P < 0,05$) WL, SG e SC em comparação ao tratamento SB. Além disso, o aumento da temperatura resultou em aumento ($P < 0,05$) da WL, SG e de SC para todos os tratamentos. Efeitos não lineares entre as cinéticas de WL, SG e SC foram observados entre as diferentes temperaturas. O modelo de Peleg foi escolhido para estimar os dados experimentais ($R^2_{adj} \geq 0,981$ e $RMSE \leq 0,013$), seus parâmetros de modelo foram significativamente afetados e estão de acordo com os efeitos causados pelos diferentes tratamentos e temperaturas. Com base nos resultados encontrados, o ultrassom foi a tecnologia com maior potencial para melhorar a difusão de sal durante o processo de salga úmida de barriga suína e o modelo de Peleg pode ser usado para simular o processo de salga nas diferentes condições estudadas.

Palavra-chave: Perda de água. Ganho de sólidos. Conteúdo de sal. Modelagem matemática. Otimização de processos.

6.1. Introdução

O bacon é um produto cárneo curado e defumado, produzido principalmente a partir da barriga suína, que está entre os produtos cárneos mais consumidos no mundo devido às suas propriedades sensoriais (DENG et al., 2021; MERLO et al., 2020). Seu processamento geralmente envolve etapas de cura, defumação e cozimento (SALDAÑA et al., 2019). A etapa de cura se refere à conservação de um produto por adição de sal, compostos fixadores de cor (nitratos e/ou nitritos), açúcar e condimentos (PAN et al., 2020). Dependendo do produto, a cura é adicionada por meio de injeção, salga seca, imersão ou a combinação dessas técnicas (GÓMEZ-SALAZAR et al., 2021; PAN et al., 2020). Particularmente, o bacon é uma matriz heterogênea que possui uma camada de pele, carne e gordura, o que torna a difusão de NaCl um processo lento.

A otimização da difusão de sal em carnes e produtos cárneos é uma área de interesse atual. Muitas tecnologias não convencionais como o campo elétrico pulsado (Cropotova et al., 2021), campo elétrico moderado e microperfurações com laser-CO₂ (Olivares et al., 2021), vácuo assistido por ultrassom (Aykın-Dinçer, 2021), tambleamento (Mirade et al., 2020), tambleamento assistido por ultrassom (Zhang et al., 2021), processamento sob alta pressão (Villacís et al., 2008), processamento por pressão variável (Jiao et al., 2022) e aplicação de vácuo (Bampi et al., 2016) tem sido estudadas para melhorar a difusão de sal. Portanto, há uma lacuna de pesquisa neste setor com o intuito de otimizar suas técnicas de processamento.

A agitação é uma operação unitária com objetivo de induzir o movimento do fluido em uma direção específica, podendo ser utilizada para acelerar as taxas de transferência de massa em processos da indústria de carne (Cárcel et al., 2007). Já o ultrassom é uma tecnologia não convencional, que vem apresentando resultados promissores para a indústria de carnes (Alarcon-Rojo et al., 2019; Barretto et al., 2018, 2020; Sanches et al., 2021, 2022). Especificamente, para processos que envolvem transferência de massa, é frequentemente utilizado o ultrassom de alta intensidade, que produz ondas sonoras em uma frequência de 20-1000 kHz e intensidades acústicas acima de 1 W/cm² (Alarcon-Rojo et al., 2015; Barretto et al., 2022). Seus efeitos sobre os processos de transferência de massa são explicados usando alguns mecanismos. Durante a propagação dessas ondas, são produzidos ciclos de compressão e descompressão, gerando bolhas de cavitação na superfície da carne, que podem fornecer microinjeção de sal. Além disso, alguns efeitos estruturais gerados, como o efeito esponja, a formação de microcanais e o aumento da distância entre as fibras musculares (Barretto

et al., 2018; Kang et al., 2016) também são responsáveis por melhorar a transferência de sal para a carne (Siró et al., 2009).

Nesses estudos que envolvem transferência de massa, modelos matemáticos geralmente são utilizados para descrever as cinéticas de processo (Alamatian et al., 2019; Aykın-Dinçer, 2021), fornecendo informações úteis para uso em futuros desenvolvimentos de processos sob diferentes condições de processamento. O modelo de difusão geralmente é utilizado para fornecer coeficientes de difusão para água e para o sal (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019a, 2019c). No entanto, a barriga suína é um produto bastante heterogêneo, pois é formada por uma camada de pele, gordura e carne, o que viola uma das condições de contorno, que é considerar a matriz da carne homogênea. Dessa forma, a utilização de modelos matemáticos empíricos, sem restrições geométricas ou condições de contorno para a sua aplicação, como Peleg (Peleg, 1988), Weibull (Cunha et al., 2001) e Zugarramurdi e Lupín (Zugarramurdi & Lupín, 1980) são alternativas viáveis para descrever os fenômenos de transferência de massa.

Até onde sabemos, não foram encontrados estudos que avaliaram os efeitos da agitação mecânica convencional (AG) e da aplicação do ultrassom (US) sobre a perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e conteúdo de sal (SC) durante a salga úmida de barriga suína, nem estudos sobre a aplicação de tais modelos para prever esses parâmetros de processo. Portanto, este estudo teve como objetivo, avaliar e comparar o impacto da AG (100 rpm) e do US (frequência de 20 kHz e potência de 800 W) sobre a WL, SG e SC, e investigar a aplicabilidade de modelos matemáticos para simular esses parâmetros durante a salga úmida de barriga suína.

6.2. Material e métodos

6.2.1. Matéria-prima

Quarenta e sete barrigas suínas ($54,03 \pm 1,45\%$ de água, $18,34 \pm 1,25\%$ de proteínas, $24,14 \pm 1,75\%$ de gordura e $0,35 \pm 0,15\%$ de cinzas), com dimensão média de $35,75 \pm 0,76$ cm de comprimento, $24 \pm 0,68$ cm de largura e $3,437 \pm 0,15$ cm de espessura foram adquiridas de um mercado local (São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil). O pH da matéria-prima estava na faixa de 5,6 a 5,8. As amostras foram embaladas a vácuo e congeladas ($-18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) até a realização dos experimentos. O processo de congelamento foi realizado para preservar as amostras e facilitar a padronização do corte (Cárcel et al., 2007).

Vinte e quatro horas antes dos experimentos, as amostras foram cortadas em formato de placas com 80 ± 1 mm de comprimento, 80 ± 1 mm de largura e $34,3 \pm 1$ mm de espessura e descongeladas em câmara refrigerada (4°C por 24 h). O tecido conjuntivo e a gordura subcutânea foram removidos antes da salga úmida. Em uma mesma barriga suína, a amostragem para cada tratamento foi realizada aleatoriamente.

6.2.2. Planejamento experimental

As salmouras saturadas foram preparadas usando água destilada e cloreto de sódio (NaCl) (Sigma-Aldrich), em temperaturas de 1°C ($0,26319$ g NaCl/g de solução), 5°C ($0,26345$ g NaCl/g de solução), 10°C ($0,26366$ g de NaCl/g de solução) e 15°C ($0,26402$ g de NaCl/g de solução). A saturação foi garantida pela presença de NaCl sólido no fundo do recipiente de processo (Cárcel et al., 2007).

Experimentos de salga úmida foram projetados de acordo com um delineamento em blocos casualizados. As amostras de barriga suína foram divididas aleatoriamente em 3 grupos para diferentes condições (salmoura estática – SB; salmoura com agitação mecânica – AG; salmoura assistida por ultrassom - US). Uma amostra ($\approx 237,56$ g) foi utilizada para cada tempo de amostragem (0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11 e 12 horas).

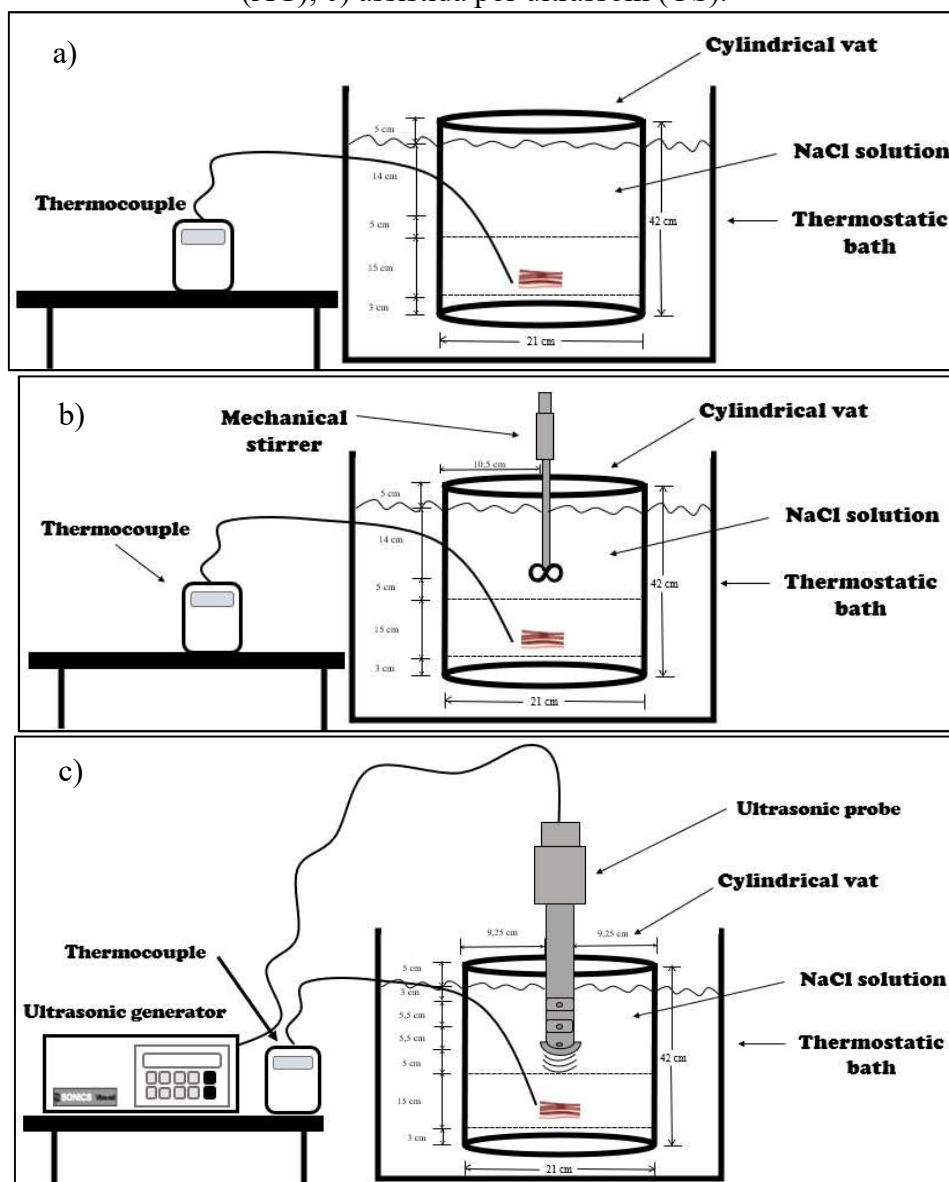
Antes de iniciar os experimentos, as salmouras e as amostras foram pré-condicionadas na temperatura de cada processo (1 , 5 , 10 e 15°C). Em seguida, salmoura e as amostras foram adicionados ao aparato experimental. As amostras foram mantidas imersas na salmoura por meio de uma grade metálica, de modo a não permitir que as amostras flutuassem durante o experimento. Para evitar alterações significativas na concentração de sal da salmoura durante o processo, foi utilizada uma relação de 1:50 (massa/massa) de carne/salmoura, conforme realizado por (Schmidt et al., 2009).

6.2.3. Tratamento por salga úmida

A Figura 6.1 mostra os aparatos experimentais utilizados nos processos de salga úmida em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US). O aparato consiste em um tanque de aço inoxidável cilíndrico (21 cm de diâmetro, 42 cm de altura) que foi imerso em um banho termostático com temperatura controlada (1 , 5 , 10 e $15 \pm 1^{\circ}\text{C}$), como realizado em estudos anteriores (Sanches et al., 2020, 2021, 2022).

A salmoura agitada mecanicamente (AG) foi realizada utilizando o mesmo aparato experimental anterior, acoplado a um agitador (Heidolph RZR1; Heidolph Instruments GMBH & Co., Schwabach, Alemanha), que foi ajustado para o trabalho a 1000 rpm, a fim de obter uma agitação intensa durante todo o processo.

Figura 6.1 - Aparato experimental: a) salmoura estática (SB); b) agitada mecanicamente (AG); c) assistida por ultrassom (US).



Para a salmoura assistida por ultrassom (US), foi utilizado um processador de ultrassom VCX-1500 (Sonics and Materials Inc., Newtown, USA) que emite ondas a uma frequência de 20 kHz. O processador foi acoplado a uma sonda de titânio Ti-6Al-4V (Sonics and Materials Inc, Newtown, EUA), que possui 2,5 cm de diâmetro. A potência do ultrassom foi fixada em 800 W, de acordo com estudos anteriores (Pan et al., 2020;

Zhang et al., 2021). A sonda foi posicionada aproximadamente 16 cm acima da superfície da amostra e em direção paralela às fibras musculares da carne e a aplicação foi realizada utilizando o sistema pulsado (1 s on; 4 s off). Esta foi a melhor condição testada na qual o ultrassom poderia ser aplicado na maior potência de entrada sem superaquecer o meio. Um termopar foi fixado ao centro da parte inferior do recipiente, perto da superfície superior da carne, para monitorar a temperatura durante o processo. Todos os processos de salga úmida foram realizados separadamente para cada tempo de amostragem e tratamento.

6.2.4. Determinações analíticas após o processo de salga úmida

Após a salga úmida, as amostras foram retiradas do recipiente de acordo com os tempos de amostragem, sendo cuidadosamente enxugadas com papel filtro para retirar o excesso de salmoura. Em seguida, a perda de água (WL) e o ganho de sólidos (SG) foram calculados respectivamente, usando as seguintes equações (1 e 2):

$$WL (\%) = \frac{x_0^w M_0^o - x_t^w M_t^o}{M_0^o} \times 100 \quad (1)$$

$$SG (\%) = \frac{x_t^{ST} M_t^o - x_0^{ST} M_0^o}{M_0^o} \times 100 \quad (2)$$

onde WL é a perda de água (%), SG é o ganho de sólidos (%), x_0^w é o teor de umidade inicial em uma base úmida (wb) (kg de água·kg de amostra⁻¹) e x_t^w é o teor de umidade final em base úmida (wb) (kg de água·kg de amostra⁻¹), M_0^o é o peso da amostra inicial (kg), M_t^o é o peso da amostra final (kg), x_t^{ST} é o teor final de sólidos (kg de sólidos·kg de amostra⁻¹) e x_0^{ST} é o teor inicial de sólidos (kg sólidos·kg de amostra⁻¹). Os subíndices “0” e “t” referem-se a amostra fresca e amostras após a salga úmida, respectivamente.

O conteúdo de sal (SC) foi determinado pela quantificação de cloretos de acordo com o método de Mohr (AOAC, 2007).

6.2.5. Modelagem matemática da cinética de WL, SG SC em barriga suína

Três modelos matemáticos (Peleg, Weibull e Zugarramurdi & Lupín) foram testados para prever a cinética de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e ganho de sal (SC) em barriga suína submetidas à salga úmida em diferentes temperaturas.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos através de regressões não lineares usando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc., EUA). Para avaliar a adequação do modelo aos dados experimentais, foram utilizados o coeficiente de determinação (R_{adj}^2) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 15).

$$RMSE = \frac{1}{n} [\sum_n (C_{pred} - C_{exp})^2]^{0,5} \quad (15)$$

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

6.2.5.1. Modelo de Peleg

O modelo de Peleg (1988) tem sido bastante utilizado na área de engenharia de alimentos para descrever processos de transferência de massa. Esse modelo (Eq. (3)) possui apenas dois parâmetros, sendo capaz de descrever a cinética de processo até condições de equilíbrio.

$$XG = -\frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (3)$$

Em que XG representa a perda de água (WL), ganho de sólidos (GS) e conteúdo de sal (SC); t é o tempo de salga úmida; k_1 e k_2 são os parâmetros do modelo.

De acordo com o modelo, os valores de k_1 representam, respectivamente, as taxas iniciais ($t=0$) de WL, SG e SC (Eq. (4)).

$$\left. \frac{d(XG)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{k_1} \quad (4)$$

Os valores de k_2 permitem determinar a perda de água em equilíbrio (WL^∞), o ganho de sólidos em equilíbrio (SG^∞) e o conteúdo de sal em equilíbrio (SC^∞), respectivamente, ou seja, quando $t \rightarrow \infty$ (Eq. (5)).

$$XG^\infty = \frac{1}{k_2} \quad (5)$$

6.2.5.2. Modelo Weibull

O modelo Weibull (Eq. (6)) descreve o comportamento de sistemas que apresentam algum grau de variabilidade (Cunha et al., 2001), como a cinética de salga úmida.

$$\frac{KG}{XG^\infty} = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (6)$$

Em que XG representa a perda de água (WL), ganho de sólidos (GS) ou conteúdo de sal (SC); α é o parâmetro de forma (adimensional); β é o parâmetro de escala (h), que

representa a cinética (e o tempo necessário para atingir 63% das condições de equilíbrio; XG^{∞} representa a perda de água no equilíbrio (WL^{∞}); o ganho de sólidos no equilíbrio (SG^{∞}) ou conteúdo de sal em equilíbrio (SC^{∞}).

6.2.5.3. Zugarramurdi & Lupín model

Zugarramurdi & Lupín (1980) propuseram um modelo matemático para prever o conteúdo de água e de sal durante a salga de peixes. Este modelo é representado pela Eq. (11).

$$XG = XG_0 \exp(-kt) + XG^{\infty}(1 - \exp(-kt)) \quad (11)$$

Em que XG representa a perda de água (WL), ganho de sólidos (GS) ou conteúdo de sal (SC); XG_0 representa a perda de água inicial, ganho de sólidos inicial ou conteúdo de sal inicial ($t = 0$), respectivamente; k é a parâmetro relacionado a transferência de massa; XG^{∞} representa a perda de água, ganho de sólidos ou o conteúdo de sal em condições de equilíbrio.

6.2.6. Análise estatística

Todos os grupos foram compostos por 15 amostras (1 amostra $\times$ 15 tempos de amostragem), e um total de 45 amostras (15 amostras $\times$ 3 tratamentos) foram salgados para uma mesma temperatura. Para todos os tratamentos, foram avaliadas 4 temperaturas (1, 5, 10 e 15 °C), totalizando 180 amostras analisadas (15 amostras $\times$ 3 tratamentos $\times$ 4 temperaturas) para cada lote. Três lotes independentes foram analisados, de modo que um total de 540 amostras (15 amostras $\times$ 3 tratamentos $\times$ 4 temperaturas $\times$ 3 lotes) foram salgadas e analisadas.

Os resultados dos parâmetros dos modelos matemáticos foram expressos como média e desvio padrão. Os dados foram analisados estatisticamente usando análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0.05$).

6.2. Resultados e discussão

6.3.1. Efeito da temperatura do processo durante a salga úmida da barriga suína

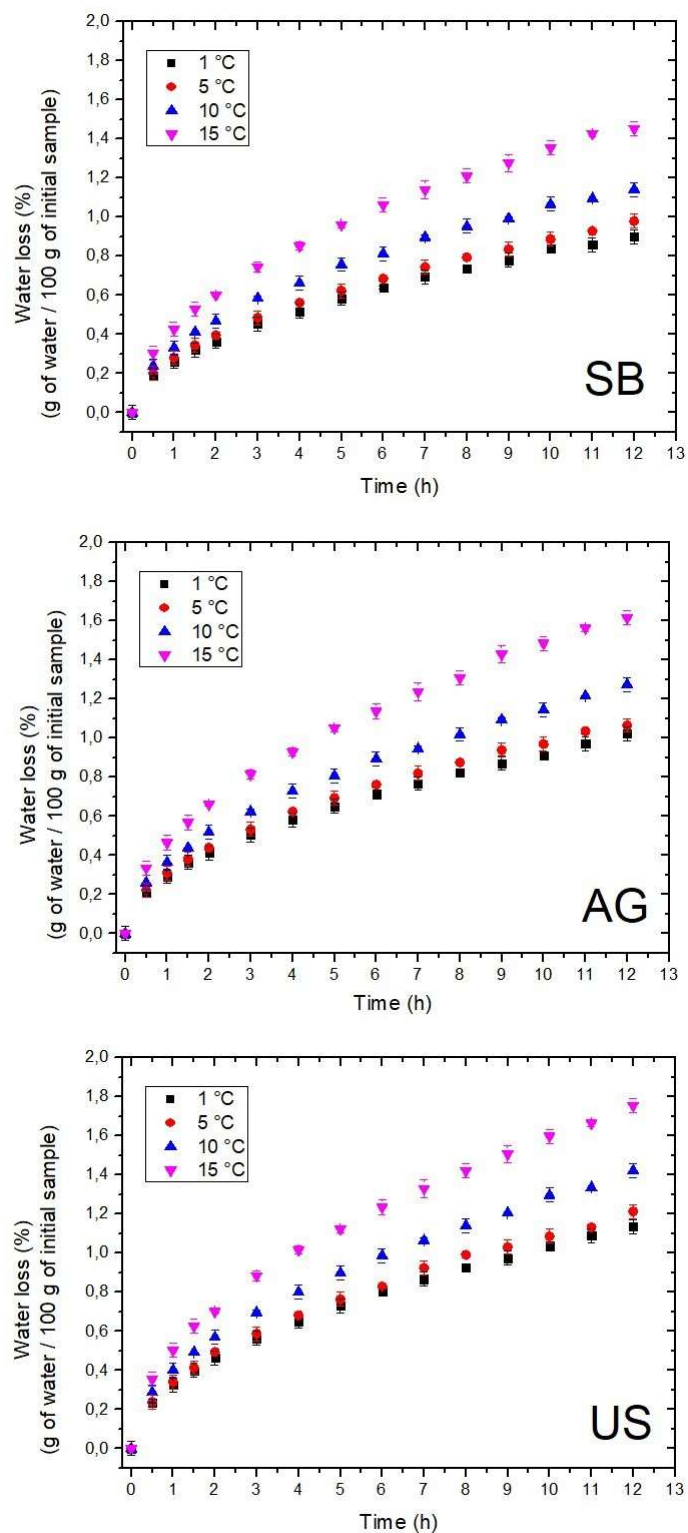
A umidade inicial da barriga suína após o descongelamento era de $54,08 \pm 0,48$ (g de água / g de amostra). A Figura 6.2 apresenta o efeito da temperatura sobre a perda de água (WL) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US), em diferentes temperaturas de

processo (1, 5, 10 e 15 °C). Todas as cinéticas de WL apresentaram o mesmo comportamento durante todo o processo, aumentando ($P<0.05$) com o aumento do tempo de salga úmida. Entretanto, um aumento acentuado sobre a WL foi observado nas primeiras 2 horas dos processos, diminuindo a taxa de difusão a partir de então. A rápida difusão no início do processo pode ser atribuída ao maior gradiente de concentração entre a salmoura e o tecido cárneo durante as fases iniciais do processo, aliado a resistência externa que é gradualmente desenvolvida devido ao acúmulo de sólidos na superfície da carne (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019c), dificultando a WL da carne.

Em relação as diferentes temperaturas estudadas, houve diferença significativa entre os tratamentos. O aumento da temperatura do processo resultou em aumento ($P<0.05$) da WL na barriga suína. Todos os tratamentos (SB, AG e US) realizados a 15 °C apresentaram uma maior ($P<0.05$) WL na barriga suína. Por outro lado, os diferentes tratamentos realizados a 1 °C apresentaram uma menor ($P<0.05$) WL entre as temperaturas estudadas. A WL para os diferentes tratamentos realizados a 5 °C são menores ($P<0.05$) que a WL para os tratamentos conduzidos a 10 °C. Além disso, nota-se que as diferenças entre as curvas de WL de todos os tratamentos (SB, AG e US) em temperaturas de 5 e 10 °C são menores que as diferenças entre as curvas cinéticas realizadas à 10 e 15 °C, demonstrando um efeito não linear entre as diferentes temperaturas de processo sobre a WL.

A Figura 6.3 mostra o efeito da temperatura sobre o ganho de sólidos (SG) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US). De maneira semelhante a WL, as diferenças entre as curvas de SG de ambos os tratamentos (SB, AG e US) realizados 10 e 15 °C são maiores que as diferenças entre as curvas dos tratamentos realizados a 1 e 5 °C, indicando também um efeito não linear do SG entre as temperaturas de processo. Em todos os casos, o aumento da temperatura do processo resultou em aumento ($P<0.05$) do SG na barriga suína. Todos os tratamentos (SB, AG e US) realizados a 1 °C apresentaram um menor ($P<0.05$) SG na barriga suína. O SG para os diferentes tratamentos realizados a 10 °C são maiores ($P<0.05$) que o SG para os tratamentos conduzidos a 5 °C. Por outro lado, os diferentes tratamentos realizados a 15 °C apresentaram um maior ($P<0.05$) SG entre as temperaturas estudadas.

Figura 6.2 - Efeito da temperatura sobre a perda de água (WL) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US).



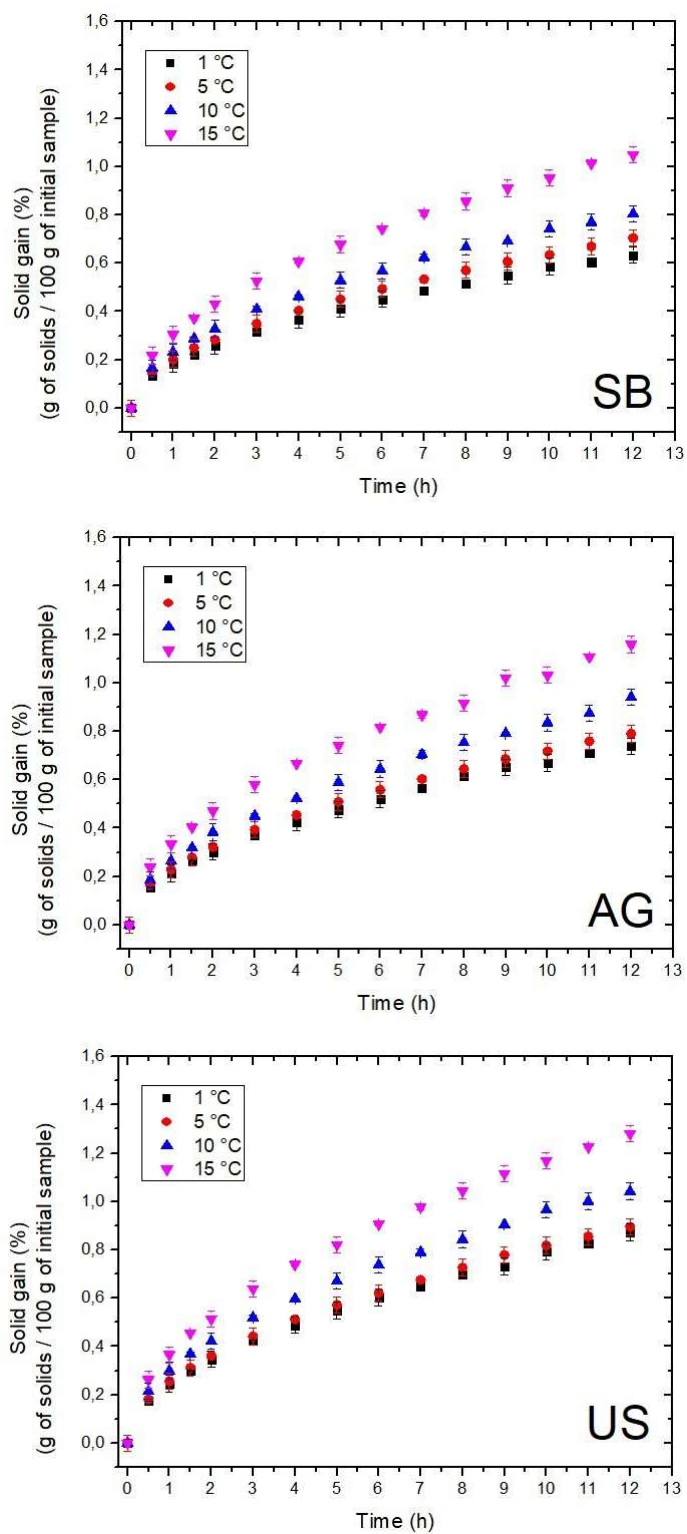
1 °C = Salga úmida conduzida a 1 °C; 5 °C = Salga úmida conduzida a 5 °C; 10 °C = Salga úmida conduzida a 10 °C e 15 °C = Salga úmida conduzida a 15 °C.

A Figura 6.4 mostra o efeito da temperatura sobre o conteúdo de sal (SC) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US). De modo semelhante ao comportamento do SG, o aumento da temperatura do processo resultou em aumento ($P<0.05$) do SC durante a salga úmida da barriga suína, onde os tratamentos realizados a 1 °C apresentaram um menor ($P<0.05$) SC e os tratamentos realizados a 15 °C apresentaram um maior ($P<0.05$) SC.

Andreou et al. (2018) avaliaram o pré-tratamento osmótico de filés de peito de frango em temperaturas de 15, 25 e 35 °C. Os autores também relataram que o aumento da temperatura durante o pré-tratamento osmótico resultou em aumento significativo da WL e do SG nos filés de peito de frango. Provavelmente, o aumento da temperatura do processo promoveu a difusão de sal e a troca de líquidos ocluídos nos poros da carne para a fase líquida externa, devido ao aumento da taxa de difusão das moléculas de água (Martins et al., 2019; Nicoletti-Telis et al., 2003), aumentando os níveis de perda de água e ganho de sal na carne. Além disso, o aumento da temperatura também afeta as propriedades viscoelásticas da carne, aumentando a permeabilidade das membranas celulares (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019b), o que também pode ter contribuído para o aumento da perda de água e do ganho de sal.

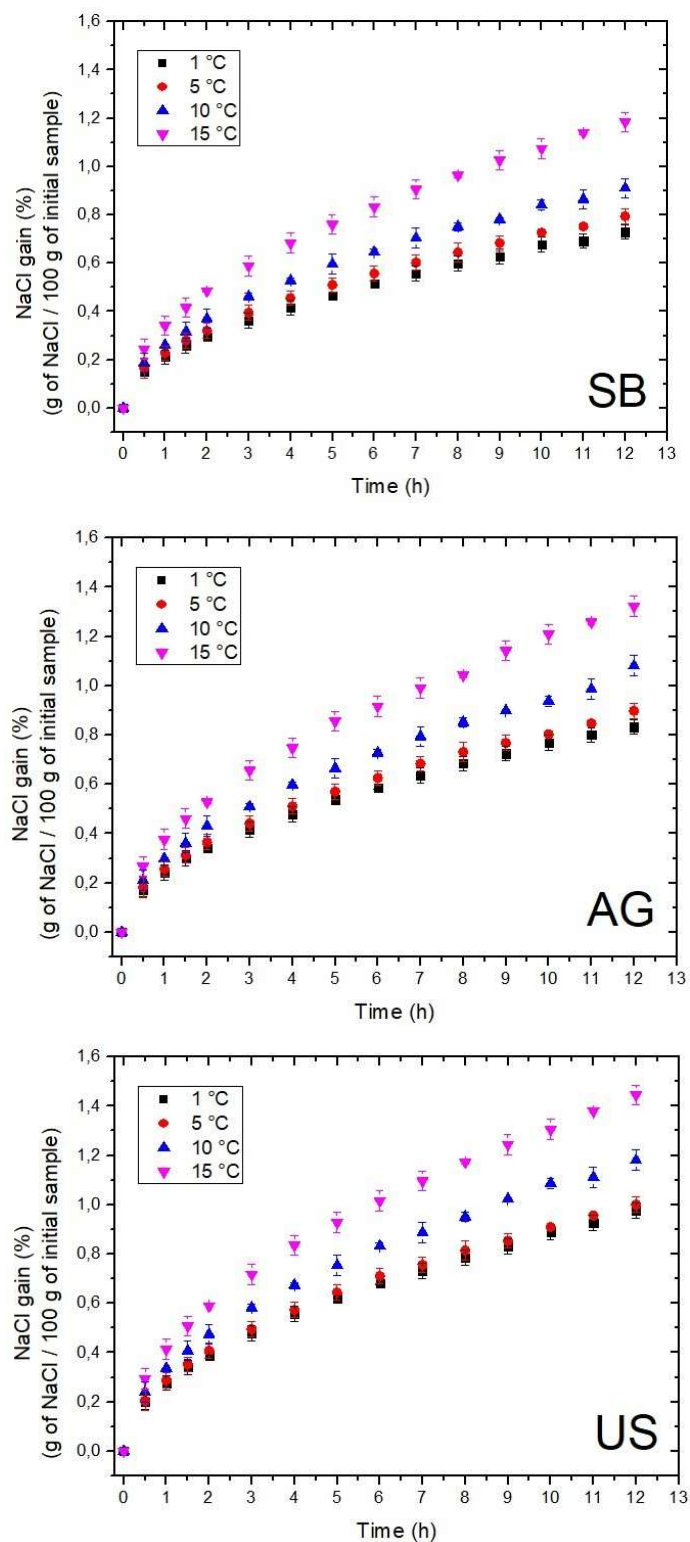
Outro aspecto importante a ser observado são as diferenças entre os resultados de SG e de SC. Ao comparar o SG e o SC, nota-se que os resultados de SC em todos os tratamentos e temperaturas estudadas são relativamente superiores aos resultados encontrados para o SG. Por exemplo, o SG após 12 horas de salga úmida em SB a 15 °C foi de aproximadamente 1,04 (g de sólidos / 100 g de amostra) e o SC nessas mesmas condições foi de aproximadamente 1,18 (g de NaCl / 100 g de amostra). De modo semelhante, o SG após 12 horas de salga úmida em US a 15 °C foi de aproximadamente 1,28 (g de sólidos / 100 g de amostra) e o SC nessas mesmas condições foi de aproximadamente 1,45 (g de NaCl / 100 g de amostra). Esse fato provavelmente está relacionado com os diferentes métodos de mensuração de SG e de SC. A mensuração do SG é baseada em métodos gravimétricos, que nesse caso acabam mensurando a perda de proteínas solúveis da carne para a salmoura como sólidos, subestimando o conteúdo real de sal na carne. Isso não ocorre no método de mensuração do SC, pois ele é determinado analiticamente, ou seja, não quantifica as perdas de proteínas solúveis durante o processo. Desta forma, o SC pode ser um parâmetro com maior precisão para determinar o ganho de sal durante estudos de salga úmida de carne.

Figura 6.3 - Efeito da temperatura sobre o ganho de sólidos (SG) durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US).



1 °C = Salga úmida conduzida a 1 °C; 5 °C = Salga úmida conduzida a 5 °C; 10 °C = Salga úmida conduzida a 10 °C e 15 °C = Salga úmida conduzida a 15 °C.

Figura 6.4 - Efeito da temperatura sobre o conteúdo de sal durante a salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US).



1 °C = Salga úmida conduzida a 1 °C; 5 °C = Salga úmida conduzida a 5 °C; 10 °C = Salga úmida conduzida a 10 °C e 15 °C = Salga úmida conduzida a 15 °C.

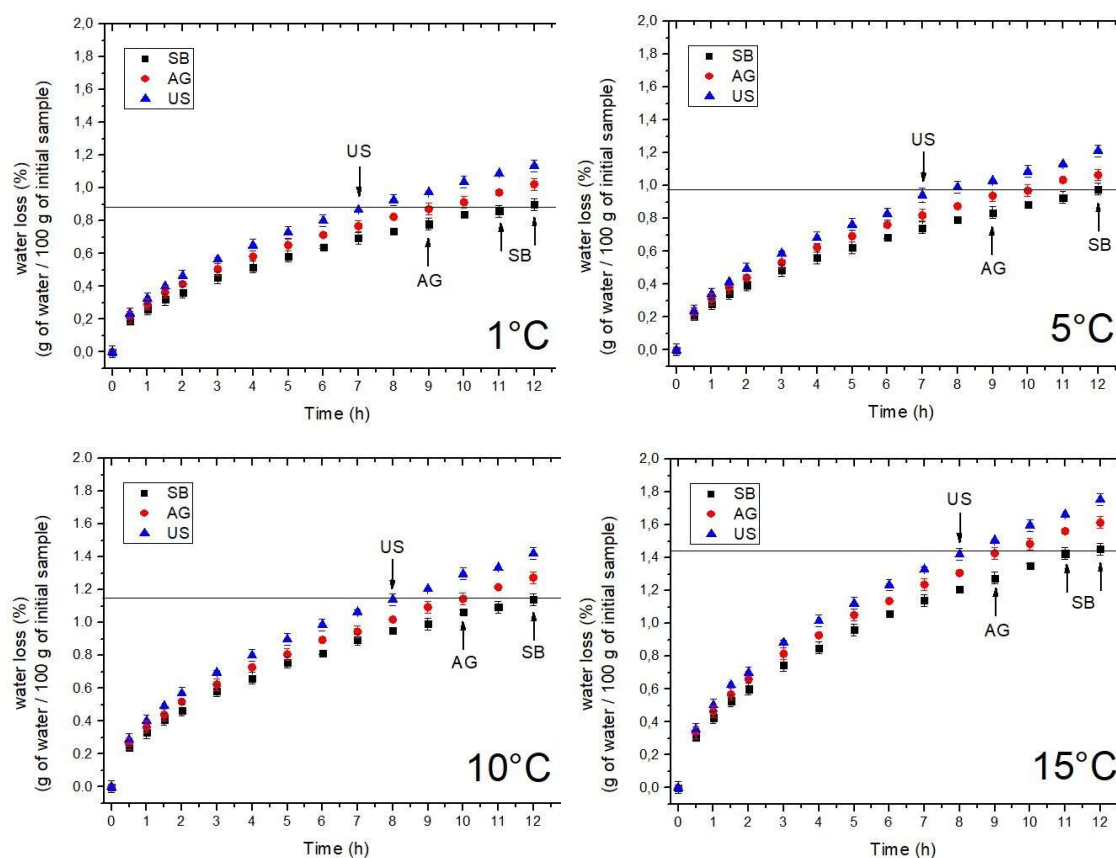
6.3.2. Efeito da salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) durante a salga úmida de barriga suína

A Figura 6.5 mostra os efeitos da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre a perda de água (WL) em diferentes temperaturas de processo. Em todas as temperaturas avaliadas, o processamento assistido por ultrassom (US) causou uma maior ($P<0.05$) WL na barriga suína, seguido do processo agitado mecanicamente (AG). O processo estático (SB) resultou em uma menor WL em todas as temperaturas avaliadas.

Os efeitos da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre o ganho de sólidos (SG) e conteúdo de sal (SC) são mostrados na Figura 6.6 e Figura 6.7, respectivamente. De maneira semelhante a WL, em todas as temperaturas estudadas, o processamento em salmoura estática (SB) resultou em um menor ($P<0.05$) SG e SC. O processamento agitado mecanicamente (AG) apresentou um maior ($P<0.05$) SG e SC, quando comparado ao SB. Provavelmente, as turbulências produzidas pela agitação reduziram a resistência externa à transferência de massa, acelerando seu transporte (Cárcel et al., 2007), o que impactou diretamente na perda de água e ganho de sal. Porém, o maior ($P<0.05$) SG e SC foram obtidos durante a salga úmida em salmoura assistida por ultrassom (US). Os resultados positivos do processamento por ultrassom provavelmente estão ligados aos efeitos da cavitação, como a formação de microjatos, o efeito esponja, a formação de microcanais e o aumento da distância entre as fibras musculares (Barretto et al., 2018; Kang et al., 2016), causando microinjeção de salmoura na superfície da carne (Alarcon-Rojo et al., 2019; Barretto et al., 2022).

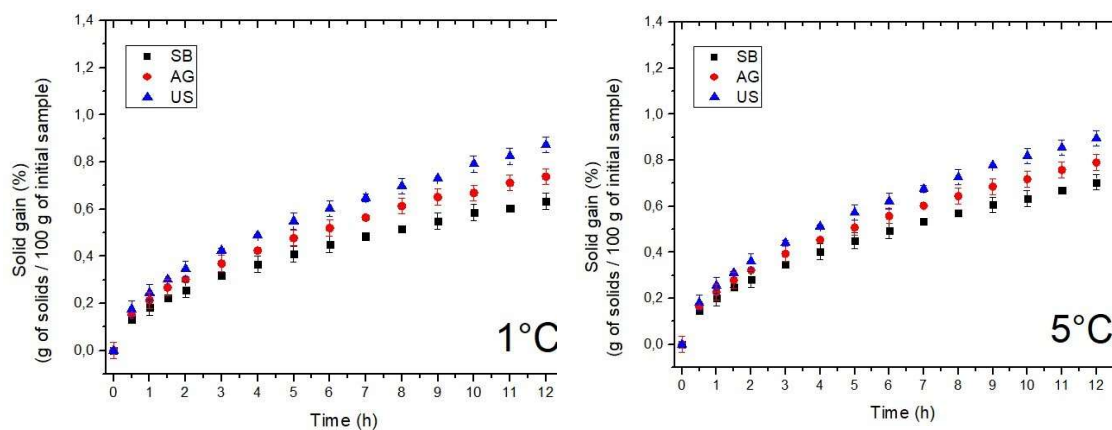
O estudo recente de Sanches et al. (2021) também relataram um efeito positivo do ultrassom sobre o ganho de sal em carne bovina. Os autores relataram que a salga úmida assistida por ultrassom aumentou o teor de NaCl, reduziu a temperatura de desnaturação das proteínas miofibrilares e reduziu a atividade de água da carne, quando comparada às amostras tratadas em salmoura estática (SB), mostrando o potencial para acelerar o processo de salga úmida. Da mesma forma, Kang et al. (2016) avaliaram os efeitos da potência do ultrassom (150, 200, 250 e 300W) para acelerar a transferência de salmoura para a carne bovina. Os autores relataram que o teor de sal das amostras aumentou à medida que a potência do ultrassom aumentou. Além disso, as imagens de microscopia eletrônica de transmissão mostraram que o espaço entre as miofibrilas aumentou com o aumento da intensidade do ultrassom.

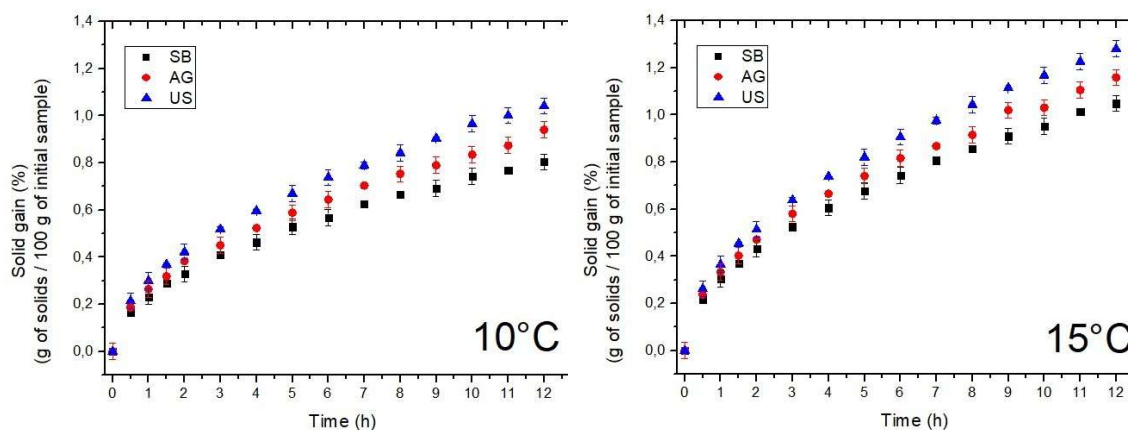
Figura 6.5 - Efeito da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre a perda de água (WL) em diferentes temperaturas de processo



1 °C = Salga úmida conduzida a 1 °C; 5 °C = Salga úmida conduzida a 5 °C; 10 °C = Salga úmida conduzida a 10 °C e 15 °C = Salga úmida conduzida a 15 °C.

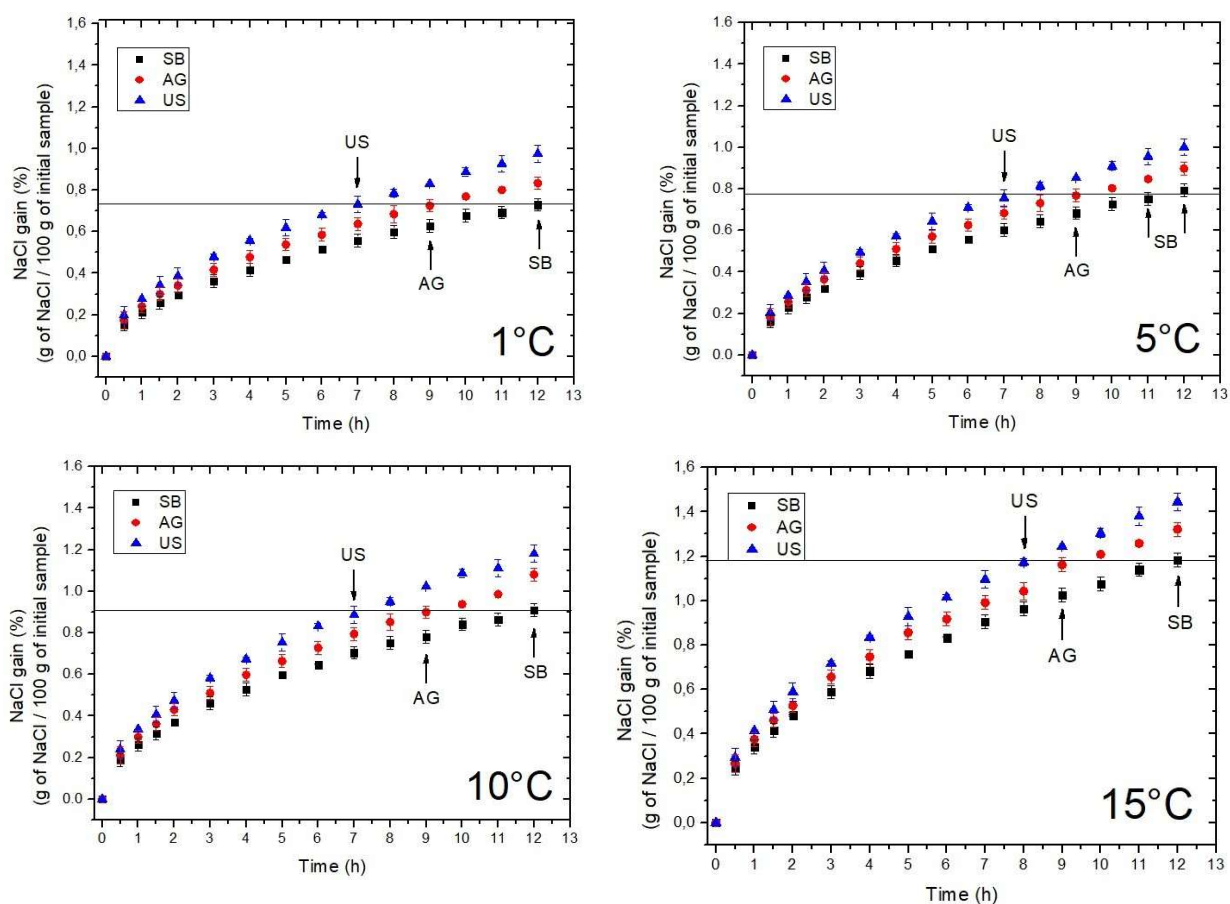
Figura 6.6 - Efeito da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre o ganho de sólidos (SG) em diferentes temperaturas de processo.





1 °C = Salga úmida conduzida a 1 °C; 5 °C = Salga úmida conduzida a 5 °C; 10 °C = Salga úmida conduzida a 10 °C e 15 °C = Salga úmida conduzida a 15 °C.

Figura 6.7 - Efeito da salga úmida de barriga suína em salmoura estática (SB), agitada mecanicamente (AG) e assistida por ultrassom (US) sobre o conteúdo de sal (SC) em diferentes temperaturas de processo.



Em relação ao tempo de salga úmida, nota-se que em todas as temperaturas avaliadas o tratamento US precisou apenas de 7 a 8 horas (dependendo da temperatura) para alcançar a mesma WL (Figura 6.5) e SC (Figura 6.7) do tratamento SB após cerca de 11 a 12 horas (dependendo da temperatura) de processo. Da mesma forma, o tratamento AG precisou de 9 a 10 horas (dependendo da temperatura) para alcançar essa mesma WL e SC. Esses resultados mostraram que a tecnologia de ultrassom e a agitação são alternativas com potencial para acelerar a salga úmida da barriga suína, reduzindo o tempo de processamento.

6.3.3. Modelagem matemática

Estimar a perda de água e o ganho de sal utilizando modelos matemáticos é extremamente importante e útil para prever o tempo de processamento necessário para a obtenção de produtos cárneos (neste caso, o bacon) com conteúdo específico de água e de sal (Schmidt et al., 2009). Em geral, todos os modelos testados foram capazes de estimar os dados experimentais de WL (com $R_{adj}^2 \geq 0,970$ e $RMSE \leq 0,014$), SG (com $R_{adj}^2 \geq 0,965$ e $RMSE \leq 0,017$) e SC (com $R_{adj}^2 \geq 0,968$ e $RMSE \leq 0,015$) durante a salga úmida de barriga suína em SB, AG e US. Os modelos de Peleg e Weibull apresentaram ajustes similares, embora tenham apresentado coeficientes de determinação ajustados (R_{adj}^2) superiores e um pequeno erro quadrático médio da raiz (RMSE), quando comparado ao modelo Zugarramurdi & Lupín (Material Suplementar). Dessa forma, por possuir uma solução matemática mais simples, quando comparado ao modelo Weibull o modelo de Peleg foi escolhido para estimar os dados experimentais deste estudo.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados dos parâmetros do modelo de Peleg para WL. Este modelo possui dois parâmetros (k_1 e k_2) que fornecem informações sobre o processo de transferência de massa. O inverso de k_1 ($1/k_1$) está relacionado com a taxa inicial de transferência de massa e o inverso de k_2 ($1/k_2$) fornece os dados de equilíbrio do processo (Peleg, 1988). Dessa forma, os tratamentos que apresentaram os menores valores de k_1 e k_2 indicam maiores taxas iniciais de WL e maiores WL em equilíbrio (XG^∞).

Tabela 6.1. Parâmetros do modelo de Peleg para Perda de água (WL).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	k_1	$3,917 \pm 0,046^a$	$3,513 \pm 0,080^b$	$3,150 \pm 0,006^c$
	k_2	$0,835 \pm 0,016^a$	$0,746 \pm 0,009^b$	$0,663 \pm 0,005^c$
	XG^∞	$1,198 \pm 0,023^c$	$1,341 \pm 0,017^b$	$1,509 \pm 0,011^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,982$	$\geq 0,989$
	RMSE	$\leq 0,008$	$\leq 0,010$	$\leq 0,009$
5	k_1	$3,661 \pm 0,039^a$	$3,280 \pm 0,054^b$	$3,053 \pm 0,042^c$
	k_2	$0,775 \pm 0,010^a$	$0,706 \pm 0,011^b$	$0,621 \pm 0,008^c$
	XG^∞	$1,291 \pm 0,016^c$	$1,417 \pm 0,022^b$	$1,610 \pm 0,020^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,981$	$\geq 0,984$	$\geq 0,984$
	RMSE	$\leq 0,010$	$\leq 0,010$	$\leq 0,011$
10	k_1	$3,020 \pm 0,058^a$	$2,872 \pm 0,086^b$	$2,608 \pm 0,075^c$
	k_2	$0,660 \pm 0,008^a$	$0,592 \pm 0,008^b$	$0,528 \pm 0,003^c$
	XG^∞	$1,516 \pm 0,018^c$	$1,690 \pm 0,023^b$	$1,892 \pm 0,011^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,989$	$\geq 0,981$	$\geq 0,992$
	RMSE	$\leq 0,013$	$\leq 0,011$	$\leq 0,009$
15	k_1	$2,354 \pm 0,085^a$	$2,210 \pm 0,013^b$	$2,010 \pm 0,026^c$
	k_2	$0,515 \pm 0,015^a$	$0,462 \pm 0,012^b$	$0,434 \pm 0,011^c$
	XG^∞	$1,941 \pm 0,056^c$	$2,165 \pm 0,056^b$	$2,304 \pm 0,055^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,982$	$\geq 0,993$	$\geq 0,995$
	RMSE	$\leq 0,014$	$\leq 0,010$	$\leq 0,011$

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; $k_1 = (h \cdot (100g \text{ de amostra/g de água}))$; $k_2 = (100g \text{ de amostra/g de água})$; XG^∞ = Perda de água em equilíbrio (g de água/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

Após a análise estatística, verificou-se que os parâmetros diferiram entre os experimentos ($P < 0,05$). Em relação aos diferentes tratamentos, US apresentou os menores ($P < 0,05$) valores de k_1 em todas as temperaturas avaliadas, indicando uma maior taxa inicial de WL. Os valores de k_1 para o tratamento AG são menores ($P < 0,05$) que os valores apresentados para US e maiores ($P < 0,05$) que os apresentados para SB, indicando que a taxa inicial de WL para AG são menores que para US e maiores que SB. Em relação ao

parâmetro k_2 , o tratamento US também apresentou os menores valores, quando comparados ao SB e AG, indicando uma maior XG^∞ . Em contraste, SB apresentou os maiores valores de k_2 , indicando uma menor XG^∞ .

Tabela 6.2. Parâmetros do modelo de Peleg para o ganho de sólidos (SG).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	k_1	$5,604 \pm 0,028^a$	$4,801 \pm 0,034^b$	$4,315 \pm 0,062^c$
	k_2	$1,188 \pm 0,026^a$	$1,016 \pm 0,007^b$	$0,857 \pm 0,022^c$
	XG^∞	$0,842 \pm 0,018^c$	$0,984 \pm 0,007^b$	$1,167 \pm 0,029^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,984$	$\geq 0,982$
	RMSE	$\leq 0,006$	$\leq 0,007$	$\leq 0,009$
5	k_1	$5,105 \pm 0,033^a$	$4,524 \pm 0,060^b$	$4,108 \pm 0,166^c$
	k_2	$1,075 \pm 0,008^a$	$0,952 \pm 0,012^b$	$0,830 \pm 0,017^c$
	XG^∞	$0,930 \pm 0,007^c$	$1,050 \pm 0,013^b$	$1,205 \pm 0,024^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,983$	$\geq 0,984$	$\geq 0,982$
	RMSE	$\leq 0,007$	$\leq 0,006$	$\leq 0,008$
10	k_1	$4,337 \pm 0,108^a$	$3,981 \pm 0,125^b$	$3,467 \pm 0,083^c$
	k_2	$0,940 \pm 0,008^a$	$0,805 \pm 0,023^b$	$0,715 \pm 0,021^c$
	XG^∞	$1,064 \pm 0,009^c$	$1,242 \pm 0,035^b$	$1,416 \pm 0,048^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,985$	$\geq 0,986$	$\geq 0,986$
	RMSE	$\leq 0,007$	$\leq 0,009$	$\leq 0,011$
15	k_1	$3,369 \pm 0,031^a$	$3,092 \pm 0,080^b$	$2,809 \pm 0,014^c$
	k_2	$0,719 \pm 0,004^a$	$0,656 \pm 0,012^b$	$0,584 \pm 0,006^c$
	XG^∞	$1,390 \pm 0,008^c$	$1,525 \pm 0,027^b$	$1,711 \pm 0,018^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,986$	$\geq 0,984$	$\geq 0,984$
	RMSE	$\leq 0,010$	$\leq 0,010$	$\leq 0,011$

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; k_1 = $(h \cdot (100g \text{ de amostra}/g \text{ de sólidos}))$; k_2 = $(100g \text{ de amostra}/g \text{ de sólidos})$; XG^∞ = Perda de água em equilíbrio (g de sólidos/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos parâmetros do modelo de Peleg para SG. Entre os diferentes tratamentos, SB apresentou os maiores valores de k_1 em todas as

temperaturas estudadas, indicando uma menor taxa inicial de SG. Por outro lado, AG apresentou um maior valor de k_1 , quando comparado ao tratamento US, indicando uma maior taxa inicial de SG para as amostras tratadas por ultrassom. Em relação aos valores de k_2 , o tratamento US apresentou os menores valores, quando comparado aos tratamentos SB e AG, indicando um maior ganho de sólidos em equilíbrio (XG^∞). Além disso, o tratamento AG também apresentou menores valores de k_2 , quando comparado ao SB, sugerindo que os tratamentos US e AG melhoraram o ganho de sólidos na carne.

Tabela 6.3. Parâmetros do modelo de Peleg para o conteúdo de sal (SC).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	k_1	$4,919 \pm 0,075^a$	$4,285 \pm 0,017^b$	$3,773 \pm 0,178^c$
	k_2	$1,028 \pm 0,010^a$	$0,898 \pm 0,005^b$	$0,769 \pm 0,029^c$
	XG^∞	$0,973 \pm 0,010^c$	$1,113 \pm 0,007^b$	$1,301 \pm 0,049^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,983$	$\geq 0,983$	$\geq 0,979$
	RMSE	$\leq 0,007$	$\leq 0,008$	$\leq 0,009$
5	k_1	$4,524 \pm 0,068^a$	$4,027 \pm 0,024^b$	$3,581 \pm 0,094^c$
	k_2	$0,951 \pm 0,017^a$	$0,845 \pm 0,004^b$	$0,755 \pm 0,011^c$
	XG^∞	$1,052 \pm 0,019^c$	$1,184 \pm 0,006^b$	$1,325 \pm 0,020^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,984$	$\geq 0,994$
	RMSE	$\leq 0,008$	$\leq 0,008$	$\leq 0,006$
10	k_1	$3,863 \pm 0,082^a$	$3,542 \pm 0,080^b$	$3,109 \pm 0,042^c$
	k_2	$0,829 \pm 0,011^a$	$0,707 \pm 0,020^b$	$0,629 \pm 0,006^c$
	XG^∞	$1,206 \pm 0,016^c$	$1,415 \pm 0,040^b$	$1,591 \pm 0,014^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,979$	$\geq 0,988$
	RMSE	$\leq 0,008$	$\leq 0,012$	$\leq 0,012$
15	k_1	$3,026 \pm 0,022^a$	$2,758 \pm 0,060^b$	$2,474 \pm 0,023^c$
	k_2	$0,635 \pm 0,010^a$	$0,570 \pm 0,015^b$	$0,524 \pm 0,012^c$
	XG^∞	$1,576 \pm 0,025^c$	$1,756 \pm 0,047^b$	$1,909 \pm 0,044^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,983$	$\geq 0,982$	$\geq 0,989$
	RMSE	$\leq 0,012$	$\leq 0,011$	$\leq 0,011$

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; k_1 = $(h \cdot (100 \text{ g de amostra/g de cloretos}))$; k_2 = $(100 \text{ g de amostra/g de cloretos})$; XG^∞ = Conteúdo de sal em

equilíbrio (g de cloretos/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados dos parâmetros do modelo de Peleg para SC. Entre os diferentes tratamentos, US novamente apresentou os menores valores de k_1 e k_2 indicando maior taxa inicial de SC e maior ganho de sal em equilíbrio (XG^∞). Entretanto, AG também apresentou menores valores de k_1 e k_2 , quando comparado ao SB, indicando que AG também apresentou maior taxa inicial de SC e maior ganho de sal em equilíbrio (XG^∞).

Em relação aos efeitos das temperatura, os parâmetros do modelo de Peleg (k_1 e k_2) para WL (Tabela 6.1), SG (Tabela 6.2) e SC (Tabela 6.3) foram nitidamente afetados. Em todos os casos, os parâmetros k_1 e k_2 foram reduzidos com o aumento da temperatura de processo, indicando que o aumento da temperatura promoveu uma maior perda de água e ganho de sal na barriga suína durante a salga úmida.

Como mostrado anteriormente, os resultados dos parâmetros do modelo de Peleg foram afetados pelos diferentes tratamentos (SB, AG, US) e pelas temperaturas avaliadas (1, 5, 10 e 15 °C), e esses efeitos estão de acordo com o comportamento encontrado durante a cinética de WL, SG e SC no processo, mostrando a robustez do modelo de Peleg em prever não somente os dados experimentais, como também os feitos das variáveis independentes avaliadas neste estudo. Além disso, dependendo da condição experimental usada e da temperatura de processo, a cinética experimental e os parâmetros do modelo de Peleg podem ser usados para estimar o tempo de imersão necessário para atingir uma concentração de água e de sal específica na barriga suína.

6.4. Conclusão

Neste estudo foram avaliados os efeitos da agitação mecânica convencional (AG) e da aplicação do ultrassom (US) sobre a perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e conteúdo de sal (SC), em comparação com a salmoura estática (SB), durante a salga úmida de barriga suína em quatro temperaturas diferentes. O aumento da temperatura aumentou a WL, o SG e o SC na barriga suína durante a salga úmida. US e AG também aumentaram a WL, SG, SC em comparação a SB. Entretanto, US apresentou desempenho superior a AG. Embora todos os modelos testados tenham sido capazes de estimar os dados experimentais de WL, SG e SC, os modelos de Peleg e o modelo de Weibull apresentaram os maiores R_{adj}^2 e menores RMSE, e por possuir uma solução matemática

mais simples, o modelo de Peleg foi escolhido para estimar os dados experimentais deste estudo. Portanto, a salmoura assistida por ultrassom e a agitação convencional são tecnologias que podem encurtar o tempo de salga úmida da barriga suína e o modelo de Peleg pode ser usado para simular os diferentes processos avaliados.

6.5. Referências

- ALAMATIAN, S., MOHEBBI, M., VARIDI, M., & MOMEN NEZHAD, M. (2019). Modeling of osmotic treatment of ostrich meat coated by tragacanth and salep. **Meat Science**, 156, 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.031>
- ALARCON-ROJO, A. D., CARRILLO-LOPEZ, L. M., REYES-VILLAGRANA, R., HUERTA-JIMÉNEZ, M., & GARCIA-GALICIA, I. A. (2019). Ultrasound and meat quality: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, 55, 369–382. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2018.09.016>
- ALARCON-ROJO, A. D., JANACUA, H., RODRIGUEZ, J. C., PANIWNKY, L., & MASON, T. J. (2015). Power ultrasound in meat processing. **Meat Science**, 107, 86–93. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2015.04.015>
- ANDREOU, V., TSIRONI, T., DERMESONLOUOGLU, E., KATSAROS, G., & TAOUKIS, P. (2018). Combinatory effect of osmotic and high pressure processing on shelf life extension of animal origin products – Application to chilled chicken breast fillets. **Food Packaging and Shelf Life**, 15, 43–51. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2017.11.002>
- AOAC. (2007). Association of Official Analytical Chemistry. **In: Official methods of analysis to AOAC International**. (18th ed.).
- AYKIN-DINÇER, E. (2021). Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. **Meat Science**, 176, 108469. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108469>
- BAMPI, M., DOMSCHKE, N. N., SCHMIDT, F. C., & LAURINDO, J. B. (2016). Influence of vacuum application, acid addition and partial replacement of NaCl by KCl on the mass transfer during salting of beef cuts. **LWT**, 74, 26–33. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.07.009>
- BARRETTO, T. L., BELLUCCI, E. R. B., BARBOSA, R. D., POLLONIO, M. A. R., ROMERO, J. T., & DA SILVA BARRETTO, A. C. (2020). Impact of ultrasound and potassium chloride on the physicochemical and sensory properties in low sodium restructured cooked ham. **Meat Science**, 165, 108130. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108130>
- BARRETTO, T. L., POLLONIO, M. A. R., TELIS-ROMERO, J., & DA SILVA BARRETTO, A. C. (2018). Improving sensory acceptance and physicochemical properties by ultrasound application to restructured cooked ham with salt (NaCl) reduction. **Meat Science**, 145, 55–62. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.05.023>

CÁRCEL, J. A., BENEDITO, J., BON, J., & MULET, A. (2007). High intensity ultrasound effects on meat brining. **Meat Science**, 76(4), 611–619. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2007.01.022>

CROPOTOVA, J., TAPPI, S., GENOVESE, J., ROCCULI, P., LAGHI, L., DALLA ROSA, M., & RUSTAD, T. (2021). Study of the influence of pulsed electric field pre-treatment on quality parameters of sea bass during brine salting. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 70, 102706. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102706>

CUNHA, L. M., OLIVEIRA, F. A. R., ABOIM, A. P., FRIAS, J. M., & PINHEIRO-TORRES, A. (2001). Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. **International Journal of Food Science and Technology**, 36(3), 253–262. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.t01-1-00447.x>

DENG, S., LIU, Y., HUANG, F., LIU, J., HAN, D., ZHANG, C., & BLECKER, C. (2021). Evaluation volatile flavor compounds during storage time in bacon made by different pig breeds. **Food Chemistry**, 357, 129765. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129765>

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D., & KATSANIDIS, E. (2019a). Diffusion coefficients and volume changes of beef meat during osmotic dehydration in binary and ternary solutions. **Food and Bioprocess Processing**, 116, 10–19. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2019.04.007>

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D., & KATSANIDIS, E. (2019b). Diffusion coefficients and volume changes of beef meat during osmotic dehydration in binary and ternary solutions. **Food and Bioprocess Processing**, 116, 10–19. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2019.04.007>

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D., & KATSANIDIS, E. (2019c). Osmotic Processing of Meat: Mathematical Modeling and Quality Parameters. **Food Engineering Reviews** 2019 12:1, 12(1), 32–47. <https://doi.org/10.1007/S12393-019-09203-1>

GALVÃO MARTINS, M., NUNES CHADA, P. S., & DA SILVA PENA, R. (2019). Application of pulsed-vacuum on the salt impregnation process of pirarucu fillet. **Food Research International**, 120, 407–414. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2019.03.016>

GÓMEZ-SALAZAR, J. A., GALVÁN-NAVARRO, A., LORENZO, J. M., & SOSA-MORALES, M. E. (2021). Ultrasound effect on salt reduction in meat products: a review. In **Current Opinion in Food Science** (Vol. 38, pp. 71–78). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.030>

JIAO, D., ZHANG, D., CHEN, R., YANG, X., SHI, H., LIU, H., WANG, Z., LU, L., & HUI, T. (2022). A developed variable pressure-assisted salting process: Improving the textural, flavor, and sensory attributes in roasted duck breast. **LWT**, 167, 113800. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113800>

KANG, D. C., WANG, A. R., ZHOU, G. H., ZHANG, W. G., XU, S. M., & GUO, G. P. (2016). Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and

NaCl concentration. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 35, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.03.009>

KANG, D., WANG, A., ZHOU, G., ZHANG, W., XU, S., & GUO, G. (2016). Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and NaCl concentration. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 35, 36–44. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2016.03.009>

LUIS BARRETTO, T., AUGUSTO, M., SANCHES, R., PATEIRO, M., LORENZO, J. M., TELIS-ROMERO, J., CARLA, A., & BARRETTO, S. (2022). **Recent advances in the application of ultrasound to meat and meat products**: Physicochemical and sensory aspects. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2028285>, 1–16. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2028285>

MERLO, T. C., DA CRUZ ANTONIO, J., SAVIAN, T. V., VILLEGAS, C., DARGELIO, M. D. B., DA SILVA PINTO, J. S., ALENCAR, S. M. DE, RODRIGUES, A. L. R., SALDAÑA, E., & CONTRERAS-CASTILLO, C. J. (2020). Effect of the smoking using Brazilian reforestation woods on volatile organic compounds, lipid oxidation, microbiological and hedonic quality of bacons during shelf life. **Meat Science**, 164, 108110. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108110>

MIRADE, P. S., PORTANGUEN, S., SICARD, J., DE SOUZA, J., MUSAVU NDOB, A., HOFFMAN, L. C., GOLI, T., & COLLIGNAN, A. (2020). Impact of tumbling operating parameters on salt, water and acetic acid transfers during biltong-type meat processing. **Journal of Food Engineering**, 265, 109686. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.109686>

NICOLETTI-TELIS, V. R., FERNANDO ROMANELLI, P., LÚCIA GABAS, A., & TELIS-ROMERO, J. (2003). Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle (1). In **Pesq. agropec. bras** (Vol. 38, Issue 4). Embrapa Informação Tecnológica. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000400012>

OLIVARES, J., NUÑEZ, H., RAMÍREZ, C., JAQUES, A., PINTO, M., FUENTES, L., ALMONACID, S., VEGA-CASTRO, O., & SIMPSON, R. (2021). Application of moderate electric fields and CO₂-laser microperforations for the acceleration of the salting process of Atlantic salmon (*Salmo salar*). **Food and Bioproducts Processing**, 125, 105–112. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2020.10.014>

PAN, Q., YANG, G. HUA, WANG, Y., WANG, X. XI, ZHOU, Y., LI, P. JUN, & CHEN, C. GUI. (2020). Application of ultrasound-assisted and tumbling dry-curing techniques for reduced-sodium bacon. **Journal of Food Processing and Preservation**, 44(8), e14607. <https://doi.org/10.1111/JFPP.14607>

PELEG, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, 53(4), 1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>

SALDAÑA, E., SOLETTI, I., MARTINS, M. M., MENEGALI, B. S., MERLO, T. C., SELANI, M. M., TEIXEIRA, A. C. B., DA SILVA, F. G., & CONTRERAS-CASTILLO, C. J. (2019). Understanding consumers' dynamic sensory perception for bacon smoked

with different Brazilian woods. **Meat Science**, *154*, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.04.006>

SANCHES, M. A. R., COLOMBO SILVA, P. M. O., BARRETTO, T. L., DARROS-BARBOSA, R., SILVA-BARRETTO, A. C. DA, & TELIS-ROMERO, J. (2021). Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound. **LWT**, *149*, 112036. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112036>

SANCHES, M. A. R., LAPINSKAS, N. M., BARRETTO, T. L., DA SILVA-BARRETTO, A. C., & TELIS-ROMERO, J. (2022). Improving salt diffusion by ultrasound application during wet salting of pork meat: A mathematical modeling approach. **Journal of Food Process Engineering**, e14143. <https://doi.org/10.1111/JFPE.14143>

SANCHES, M. A. R., SILVA, P. M. O. C., BARBOSA, R. D., ROMERO, J. T., & BARRETTO, A. C. DA S. (2020). Mass transfer in beef: Effect of crossbreeding and ultrasound application. **Scientia Agricola**, *78*(5), 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0335>

SCHMIDT, F. C., CARCIOFI, B. A. M., & LAURINDO, J. B. (2009). Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, *91*(4), 553–559. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.10.003>

SIRÓ, I., VÉN, CS., BALLA, CS., JÓNÁS, G., ZEKE, I., & FRIEDRICH, L. (2009). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. **Journal of Food Engineering**, *91*(2), 353–362. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.09.015>

VILLACÍS, M. F., RASTOGI, N. K., & BALASUBRAMANIAM, V. M. (2008). Effect of high pressure on moisture and NaCl diffusion into turkey breast. **LWT - Food Science and Technology**, *41*(5), 836–844. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2007.05.018>

ZHANG, J., ZHANG, Y., ZOU, Y., & ZHANG, W. (2021). Effects of ultrasound-assisted cooking on quality characteristics of spiced beef during cold storage. **LWT**, *136*, 110359. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110359>

ZHANG, R., ZHANG, J., ZHOU, L., WANG, L., & ZHANG, W. (2021). Influence of ultrasound-assisted tumbling on NaCl transport and the quality of pork. **Ultrasonics Sonochemistry**, *79*, 105759. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2021.105759>

ZUGARRAMURDI, A., & LUPÍN, H. M. (1980). A model to explain observed behavior on fish salting. **Journal of Food Science**, *45*(5), 1305–1311. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1980.TB06543.X>

APÊNDICE A – Material Suplemntar

Tabela 6.4. Parâmetros do modelo Weibull para Perda de água (WL).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	α	$0,746 \pm 0,002^b$	$0,742 \pm 0,003^b$	$0,759 \pm 0,001^a$
	β	$6,471 \pm 0,114^a$	$6,548 \pm 0,190^a$	$6,134 \pm 0,043^b$
	XG^∞	$1,052 \pm 0,019^c$	$1,178 \pm 0,013^b$	$1,324 \pm 0,010^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,981$	$\geq 0,990$
	RMSE	$\leq 0,009$	$\leq 0,010$	$\leq 0,008$
5	α	$0,744 \pm 0,000^b$	$0,745 \pm 0,002^b$	$0,764 \pm 0,002^a$
	β	$6,542 \pm 0,151^a$	$6,485 \pm 0,140^a$	$6,291 \pm 0,048^b$
	XG^∞	$1,133 \pm 0,013^c$	$1,249 \pm 0,015^b$	$1,410 \pm 0,017^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,982$	$\geq 0,983$	$\geq 0,989$
	RMSE	$\leq 0,009$	$\leq 0,011$	$\leq 0,009$
10	α	$0,762 \pm 0,002^a$	$0,759 \pm 0,001^a$	$0,763 \pm 0,001^a$
	β	$5,909 \pm 0,177^b$	$6,256 \pm 0,131^a$	$6,285 \pm 0,156^a$
	XG^∞	$1,332 \pm 0,014^c$	$1,482 \pm 0,018^b$	$1,658 \pm 0,010^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,991$	$\geq 0,984$	$\geq 0,990$
	RMSE	$\leq 0,008$	$\leq 0,009$	$\leq 0,011$
15	α	$0,761 \pm 0,003^a$	$0,761 \pm 0,001^a$	$0,763 \pm 0,003^a$
	β	$5,888 \pm 0,294^a$	$6,166 \pm 0,155^a$	$5,985 \pm 0,239^a$
	XG^∞	$1,706 \pm 0,046^c$	$1,899 \pm 0,047^b$	$2,026 \pm 0,047^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,988$	$\geq 0,989$	$\geq 0,991$
	RMSE	$\leq 0,011$	$\leq 0,012$	$\leq 0,013$

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; α = parâmetro de forma (adimensional); β (h) = parâmetro da escala de tempo (h); XG^∞ = Perda de água em equilíbrio (g de água/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

Tabela 6.5. Parâmetros do modelo Zugarramurdi & Lupín para Perda de água (WL).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	k	$0,233 \pm 0,004^a$	$0,232 \pm 0,006^a$	$0,231 \pm 0,001^a$
	XG^∞	$0,905 \pm 0,015^c$	$1,015 \pm 0,009^b$	$1,139 \pm 0,008^a$
	R_{adj}^2	0,973	0,970	0,974
	RMSE	0,012	0,014	0,015
5	k	$0,232 \pm 0,004^a$	$0,235 \pm 0,006^a$	$0,225 \pm 0,002^b$
	XG^∞	$0,976 \pm 0,010^c$	$1,072 \pm 0,013^b$	$1,210 \pm 0,015^a$
	R_{adj}^2	0,970	0,973	0,973
	RMSE	0,014	0,014	0,016
10	k	$0,238 \pm 0,006^a$	$0,227 \pm 0,008^a$	$0,224 \pm 0,005^a$
	XG^∞	$1,148 \pm 0,010^c$	$1,274 \pm 0,013^b$	$1,423 \pm 0,010^a$
	R_{adj}^2	0,974	0,972	0,971
	RMSE	0,015	0,018	0,019
15	k	$0,239 \pm 0,010^a$	$0,230 \pm 0,005^a$	$0,233 \pm 0,010^a$
	XG^∞	$1,471 \pm 0,035^b$	$1,633 \pm 0,038^a$	$1,748 \pm 0,039^a$
	R_{adj}^2	0,972	0,973	0,986
	RMSE	0,020	0,022	0,023

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; k (1/h) = Parâmetro do modelo; XG^∞ = Perda de água em equilíbrio (g de água/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

Tabela 6.6. Parâmetros do modelo Weibull para Ganho de sólidos (SG).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	α	$0,746 \pm 0,004^a$	$0,746 \pm 0,004^a$	$0,748 \pm 0,002^a$
	β	$6,533 \pm 0,046^b$	$6,520 \pm 0,110^b$	$6,917 \pm 0,247^a$
	XG^∞	$0,741 \pm 0,013^c$	$0,864 \pm 0,006^b$	$1,021 \pm 0,024^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,985$	$\geq 0,982$	$\geq 0,980$
	RMSE	$\leq 0,005$	$\leq 0,008$	$\leq 0,010$
5	α	$0,746 \pm 0,001^a$	$0,746 \pm 0,001^a$	$0,750 \pm 0,001^a$
	β	$6,556 \pm 0,056^b$	$6,552 \pm 0,044^b$	$6,775 \pm 0,316^a$
	XG^∞	$0,816 \pm 0,006^c$	$0,921 \pm 0,011^b$	$1,055 \pm 0,020^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,982$	$\geq 0,984$	$\geq 0,982$
	RMSE	$\leq 0,008$	$\leq 0,007$	$\leq 0,009$
10	α	$0,747 \pm 0,001^b$	$0,748 \pm 0,003^b$	$0,763 \pm 0,004^a$
	β	$6,354 \pm 0,113^b$	$6,799 \pm 0,342^a$	$6,189 \pm 0,273^c$
	XG^∞	$0,934 \pm 0,009^c$	$1,088 \pm 0,028^b$	$1,226 \pm 0,034^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,985$	$\geq 0,980$	$\geq 0,989$
	RMSE	$\leq 0,007$	$\leq 0,010$	$0,008$
15	α	$0,746 \pm 0,001^c$	$0,758 \pm 0,003^b$	$0,764 \pm 0,002^a$
	β	$6,468 \pm 0,025^a$	$6,097 \pm 0,198^b$	$6,132 \pm 0,074^b$
	XG^∞	$1,221 \pm 0,007^c$	$1,339 \pm 0,022^b$	$1,500 \pm 0,014^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,984$	$\geq 0,989$
	RMSE	$\leq 0,012$	$\leq 0,010$	$\leq 0,009$

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; α = parâmetro de forma (adimensional); β (h) = parâmetro da escala de tempo (h); XG^∞ = Ganho de sólidos em equilíbrio (g de sólidos/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

Tabela 6.7. Parâmetros do modelo Zugarramurdi & Lupín para o Ganho de sólidos (SG).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	k	$0,231 \pm 0,002^a$	$0,232 \pm 0,003^a$	$0,221 \pm 0,007^a$
	XG^∞	$0,641 \pm 0,013^c$	$0,744 \pm 0,005^b$	$0,876 \pm 0,019^a$
	R_{adj}^2	0,973	0,971	0,970
	RMSE	0,008	0,010	0,012
5	k	$0,231 \pm 0,001^a$	$0,231 \pm 0,001^a$	$0,224 \pm 0,009^a$
	XG^∞	$0,702 \pm 0,005^c$	$0,793 \pm 0,009^b$	$0,905 \pm 0,016^a$
	R_{adj}^2	0,971	0,973	0,971
	RMSE	0,010	0,010	0,012
10	k	$0,237 \pm 0,003^a$	$0,224 \pm 0,010^a$	$0,227 \pm 0,009^a$
	XG^∞	$0,805 \pm 0,008^c$	$0,934 \pm 0,021^b$	$1,053 \pm 0,025^a$
	R_{adj}^2	0,974	0,970	0,970
	RMSE	0,010	0,013	0,014
15	k	$0,233 \pm 0,001^a$	$0,232 \pm 0,007^a$	$0,229 \pm 0,002^a$
	XG^∞	$1,051 \pm 0,007^c$	$1,153 \pm 0,017^b$	$1,289 \pm 0,011^a$
	R_{adj}^2	0,973	0,965	0,987
	RMSE	0,014	0,017	0,015

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; k (1/h) = Parâmetro do modelo; XG^∞ = Ganho de sólidos em equilíbrio (g de sólidos/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

Tabela 6.8. Parâmetros do modelo Weibull para o Conteúdo de sal (SC).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	α	$0,747 \pm 0,002^a$	$0,746 \pm 0,003^a$	$0,748 \pm 0,003^a$
	β	$6,583 \pm 0,061^b$	$6,586 \pm 0,049^b$	$6,757 \pm 0,538^a$
	XG^∞	$0,853 \pm 0,008^c$	$0,977 \pm 0,005^b$	$1,140 \pm 0,039^a$
	R_{adj}^2	$\geq 0,984$	$\geq 0,982$	$\geq 0,978$
	RMSE	$\leq 0,006$	$\leq 0,010$	$\leq 0,011$
5	α	$0,746 \pm 0,001^a$	$0,747 \pm 0,001^a$	$0,753 \pm 0,005^a$
	β	$6,562 \pm 0,052^a$	$6,565 \pm 0,004^a$	$6,095 \pm 0,119^b$
	XG^∞	$0,923 \pm 0,017^c$	$1,039 \pm 0,005^b$	$1,162 \pm 0,017^a$
	R_{adj}^2	0,981	0,984	0,991
	RMSE	0,009	0,008	0,007
10	α	$0,735 \pm 0,020^a$	$0,753 \pm 0,005^a$	$0,761 \pm 0,001^a$
	β	$6,952 \pm 0,854^a$	$6,734 \pm 0,495^b$	$6,229 \pm 0,002^c$
	XG^∞	$1,059 \pm 0,014^c$	$1,238 \pm 0,031^b$	$1,389 \pm 0,016^a$
	R_{adj}^2	0,980	0,978	0,990
	RMSE	0,010	0,013	0,009
15	α	$0,761 \pm 0,001^a$	$0,763 \pm 0,003^a$	$0,761 \pm 0,002^a$
	β	$6,120 \pm 0,141^a$	$6,198 \pm 0,255^a$	$6,083 \pm 0,144^a$
	XG^∞	$1,383 \pm 0,020^c$	$1,539 \pm 0,038^b$	$1,675 \pm 0,037^a$
	R_{adj}^2	0,986	0,985	0,991
	RMSE	0,009	0,010	0,010

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; α = parâmetro de forma (adimensional); β (h) = parâmetro da escala de tempo (h); XG^∞ = Conteúdo de sal em equilíbrio (g de cloretos/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

Tabela 6.9. Parâmetros do modelo Zugarramurdi & Lupín para o Conteúdo de sal (SC).

T (°C)	Parâmetros	SB	AG	US
1	k	$0,230 \pm 0,002^a$	$0,230 \pm 0,001^a$	$0,226 \pm 0,015^a$
	XG^∞	$0,733 \pm 0,007^c$	$0,840 \pm 0,004^b$	$0,979 \pm 0,029^a$
	R_{adj}^2	0,972	0,971	0,968
	RMSE	0,010	0,011	0,014
5	k	$0,231 \pm 0,001^a$	$0,230 \pm 0,000^a$	$0,231 \pm 0,003^a$
	XG^∞	$0,794 \pm 0,014^c$	$0,893 \pm 0,005^b$	$1,000 \pm 0,015^a$
	R_{adj}^2	0,973	0,973	0,973
	RMSE	0,011	0,012	0,013
10	k	$0,236 \pm 0,004^a$	$0,222 \pm 0,008^a$	$0,226 \pm 0,007^a$
	XG^∞	$0,911 \pm 0,012^c$	$1,062 \pm 0,023^b$	$1,187 \pm 0,019^a$
	R_{adj}^2	0,973	0,968	0,985
	RMSE	0,012	0,015	0,016
15	k	$0,230 \pm 0,004^a$	$0,228 \pm 0,009^a$	$0,232 \pm 0,004^a$
	XG^∞	$1,189 \pm 0,016^c$	$1,322 \pm 0,029^b$	$1,442 \pm 0,030^a$
	R_{adj}^2	0,972	0,971	0,986
	RMSE	0,016	0,018	0,019

a-c = Letras diferentes na mesma linha significam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos; SB = salmoura estática; AG = salmoura agitada mecanicamente; US = salmoura assistida por ultrassom; k (1/h) = Parâmetro do modelo; XG^∞ = Conteúdo de sal em equilíbrio (g de cloretos/100g de amostra); R_{adj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = Raiz do erro quadrático médio.

7 CAPÍTULO IV - “Efeito da temperatura e da composição química nas propriedades de sorção de água de bacon”

Bruna Grassetti Fonseca¹, Marcio Augusto Ribeiro Sanches¹, Maria Júlia Neves Martins¹,
Nathália Lisboa Souza¹, Tiago Carregari Polachini¹ e Javier Telis-Romero¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Instituto de
Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Departamento de Engenharia e
Tecnologia de Alimentos (DETA)

Artigo a ser submetido à Revista: *Meat Science*, 2023.

Resumo: Nesta pesquisa, as isotermas de sorção de água de cinco marcas de bacon comercial com diferentes composições químicas foram avaliadas simulando as condições de armazenamento em diferentes temperaturas. Amostras de bacon caracterizadas quimicamente foram submetidas ao método gravimétrico estático para obter experimentalmente as isotermas de adsorção de água em temperaturas de 7, 12, 17, 22, 27, 32 °C. Os modelos de GAB, Peleg, Oswin, Henderson e Halsey foram ajustados aos dados experimentais de sorção de água. As isotermas de sorção de água corresponderam às características do tipo III, que geralmente são atribuídas a produtos com alto teor de proteína e compostos solúveis como sais presentes nesse tipo de produto. Como o modelo mais bem ajustado ($R^2_{\text{adj}} \geq 0,995$; $\chi^2 \leq 3,071E^{-04}$ e $\text{RMSE} \leq 0,044$), os parâmetros do modelo de GAB foram usados para obter informações sobre a água da monocamada. O aumento da temperatura reduziu o teor de umidade de equilíbrio do produto. Por outro lado, o aumento da umidade relativa aumentou o teor de umidade de equilíbrio do produto, independentemente da temperatura de armazenamento. Além disso, produtos com maior conteúdo de sódio apresentaram maior teor de umidade de equilíbrio, principalmente em regiões de alta atividade de água.

7.1. Introdução

O bacon é um produto curado e defumado, sendo muito apreciado pelos consumidores e que está entre os produtos cárneos mais consumidos no mundo devido às suas propriedades sensoriais, sendo produzido principalmente a partir da barriga suína (DENG et al., 2021; MERLO et al., 2020). Sua produção envolve etapas como marinação, defumação e processo térmico adequado (SALDAÑA et al., 2019).

Durante as etapas de processamento, armazenamento, até o consumo deste produto, ocorrem reações complexas de proteólise e lipólise (Gan et al., 2019), que estão relacionadas com as vias de formação de compostos voláteis e de sabor característicos deste produto (LORIDO et al., 2016). Essas reações estão associadas as alterações bioquímicas complexas que ocorrem na matriz da carne, especificamente oxidação lipídica e proteica (DOMÍNGUEZ et al., 2019). Como consequência de todas essas etapas, a qualidade final deste produto depende de muitos fatores, incluindo a composição da matéria prima, principalmente em termos de proteínas e gorduras, além das condições de processamento e armazenamento como a temperatura e a umidade relativa do ambiente.

A temperatura e a umidade relativa do ambiente afetam a atividade de água da carne (AHMAT et al., 2014; AYKIN-DINÇER & ERBAŞ, 2018; LOPES FILHO et al., 2002a). No caso específico dos produtos cárneos, essas alterações podem influenciar não apenas o crescimento microbiano, mas também a textura do produto. Enzimas como proteases e lipases podem ter sua atividade afetada por diferentes condições de atividade de água (JIN et al., 2013; TOLDRÁ, 2006). Além disso, a composição química da matéria-prima, principalmente em termos de proteínas, gorduras (BARRETTO et al., 2018; BETIOL et al., 2020) e conteúdo de sal (COMAPOSADA et al., 2000; KABIL et al., 2012) afetam a atividade de água de produtos cárneos. Por isso, o controle de cada etapa é necessário para a obtenção de um produto altamente saboroso e seguro. No entanto, o conteúdo de água por si só não permite prever e avaliar essas alterações que ocorrem durante a vida útil de produtos cárneos. Por essa razão, a compreensão das interações entre a água e os componentes da matriz alimentar é um indicador mais adequado para prever a estabilidade microbiana ou físico-química desse tipo de produto.

Isotermas de sorção é uma maneira interessante de fornecer informações sobre a atividade da água e o teor de umidade de equilíbrio de um produto a uma determinada temperatura (AHMAT et al., 2014; FREITAS et al., 2016). As melhores condições de processamento e armazenamento podem ser alcançadas pela compreensão do

comportamento de sorção de água em produtos alimentícios (BARRETTO et al., 2018; COMAPOSADA et al., 2007; LOPES FILHO et al., 2002). Esse procedimento pode ser realizado em diferentes temperaturas, evitando alterações indesejadas e aumentando a vida útil (STAUDT et al., 2013). Além de construir as isotermas de sorção, sua modelagem é fundamental para o projeto de operações envolvidas durante o processamento, embalagem, estudos de prazo de validade e avaliação de alterações físico-químicas principalmente durante as condições de armazenamento (AYKIN-DINÇER & ERBAŞ, 2018).

Até onde sabemos, algumas pesquisas foram relatadas sobre o efeito da temperatura (AYKIN-DINÇER & ERBAŞ, 2018; CLEMENTE et al., 2009; DELGADO & SUN, 2002; LOPES FILHO et al., 2002b) e o efeito simultâneo da temperatura e composição química (BARRETTO et al., 2018; BETIOL et al., 2020) sobre as isotermas de sorção de água de carnes e produtos cárneos, porém nenhum estudo avaliou o efeito simultâneo da temperatura e da composição química sobre as propriedades de sorção de água para o bacon. Diante disso, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar a influência da temperatura e da composição química sobre as isotermas de sorção de água de cinco marcas comerciais de bacon e avaliar a aplicabilidade de modelos matemáticos para simular as isotermas nestas diferentes condições.

7.2. Materiais e Métodos

7.2.1. Preparo das amostras

Bacons comerciais de cinco marcas diferentes foram adquiridos em um mercado local em São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil e armazenados a 5 °C (± 2 °C) até a realização dos experimentos. Por motivos de sigilo, as cinco marcas registradas foram codificadas como cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5). Para cada tratamento, três lotes diferentes foram comprados e utilizados neste estudo.

7.2.2. Composição química

A composição química de cada tratamento foi realizada em cinco repetições de acordo com os procedimentos recomendados pela Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2007). A umidade foi quantificada pelo método gravimétrico (método 950,46), o teor de cinzas foi quantificado por incineração em forno mufla (método 920,153) e o teor de proteína foi quantificado pelo método de Kjeldahl (método 981,10).

O teor de lipídios foi quantificado utilizando o método de Bligh & Dyer (1959). O teor de sódio foi analisado por digestão à seco como descrito por (Barretto et al., 2018).

7.2.3. Determinação das isotermas de sorção

O comportamento das isotermas de sorção de água das amostras de bacon comerciais foi determinado utilizando o método gravimétrico estático, conduzido em diferentes temperaturas (7, 12, 17, 22, 27, 32 °C), para simular as possíveis condições de armazenamento (temperatura de refrigeração e ambiente) deste tipo de produto. Dessecadores contendo diferentes soluções salinas saturadas de LiBr, LiCl, LiI, MgCl₂, NaI, NaBr, KI, NaNO₂, NaCl, KCl e KNO₃ dissolvidos em água deionizada foram utilizados para atingir um intervalo de umidade relativa entre 5,86% e 96,31%. A saturação das soluções foi garantida pela presença de sais não dissolvidos no fundo dos recipientes.

Amostras de bacon ($1 \text{ g} \pm 0,1 \text{ mg}$) foram pesadas em recipientes de 80 mL, em triplicata, e colocadas em dessecadores contendo várias soluções salinas proporcionando as umidades relativas desejadas. Os dessecadores foram mantidos em câmara BOD (MA415, Marconi, Piracicaba, Brasil) nas temperaturas estudadas. As amostras foram pesadas em balança analítica (AUY220, Shimadzu, Kyoto, Japão) com precisão de 0,1 mg, até atingir os mesmos níveis de umidade do meio (umidade de equilíbrio). O teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) de cada condição foi medido pela diferença de peso em relação à umidade inicial. Os valores de X_{eq} em função da atividade de água (a_w) para cada temperatura foram usados para traçar as curvas de isotermas de sorção de água.

7.2.4. Modelagem de isotermas de sorção

Vários modelos matemáticos são comumente encontrados na literatura para descrever as isotermas de sorção de água de carnes e produtos cárneos. A Tabela 7.1 mostra os modelos matemáticos que foram testados para descrever as isotermas de sorção de bacon. Os ajustes dos modelos aos dados experimentais foram realizados por regressões não-lineares usando o software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

Tabela 7.1. Modelos usados para ajustar as isotermas de sorção de água do bacon.

Modelo	Equação	Referência
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times k \times a_w}{(1 - k \times a_w)(1 + (C - 1)k \times a_w)} \quad (1)$	Lomauro et al. (1985)
PELEG	$X_{eq} = k_1 \times a_w^{n_1} + k_2 \times a_w^{n_2} \quad (2)$	Peleg (1993)
OSWIN	$X_{eq} = M \times \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^N \quad (3)$	Oswin (1946)
HENDERSON	$X_{eq} = \left(-\frac{1}{H_1} \times \ln(1 - a_w) \right)^{\frac{1}{H_2}} \quad (4)$	Henderson (1952)
HALSEY	$X_{eq} = (-h_1 \times \ln(a_w))^{-\frac{1}{h_2}} \quad (5)$	Van Den Berg & Bruin (1981)

C, k, k_1 , n_1 , k_2 , n_2 , M, N, h_1 , h_2 , H_1 e H_2 são constantes dos modelos, X_m representa o conteúdo da monocamada de umidade (base seca), X_{eq} é o equilíbrio de umidade e a_w é a atividade de água.

7.2.5. Análise estatística

Os resultados da composição química foram expressos como média e erro padrão da média, sendo analisados estatisticamente utilizando o modelo linear geral (GLM) e as médias comparadas utilizando o teste de Tukey ($p \leq 0,05$), utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc., EUA).

A qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais de sorção de água foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ajustado (R_{Adj}^2) e o qui-quadrado reduzido (χ^2) obtido a partir do software matemático OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA). Coeficientes de determinação próximos a 1 e qui-quadrado reduzido próximo de 0 indicam uma maior precisão do modelo para dados experimentais.

7.3. Resultados e discussão

7.3.1. Composição química

Os resultados da composição química das diferentes marcas de bacon comercial são apresentados na Tabela 7.2. Existem vários fatores que influenciam a composição química da carne suína, incluindo raça suína, corte, idade do animal, práticas e métodos de produção (Jiménez-Colmenero et al., 2010), que por sua vez, impactam diretamente no produto cárneo.

Tabela 7.2. Composição química das cinco diferentes amostras de bacon.

%	AMOSTRA					SEM ¹	Valor p ²
	T1	T2	T3	T4	T5		
Proteínas	18,21 ± 0,27 ^a	16,16 ± 0,43 ^b	12,99 ± 0,55 ^c	12,59 ± 0,22 ^c	18,20 ± 0,07 ^a	0,501	<0,01
Gorduras	38,59 ± 0,27 ^{bc}	37,60 ± 0,71 ^c	39,55 ± 0,37 ^b	41,63 ± 0,87 ^a	37,60 ± 0,55 ^c	0,326	<0,01
Cinzas	2,83 ± 0,09 ^c	3,13 ± 0,22 ^b	3,89 ± 0,21 ^a	3,21 ± 0,27 ^b	2,63 ± 0,04 ^d	0,099	<0,01
Umidade	39,19 ± 0,26 ^c	42,42 ± 0,19 ^a	43,22 ± 0,88 ^a	42,49 ± 0,62 ^a	40,87 ± 0,55 ^b	0,312	<0,01
Sódio ³	0,87 ± 0,01 ^c	1,05 ± 0,02 ^b	1,98 ± 0,017 ^a	1,07 ± 0,03 ^b	0,56 ± 0,01 ^d	0,097	<0,01

¹Erro padrão da média. ²As médias seguidas da mesma letra na mesma linha não apresentaram diferenças significativas no teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ³(mg de sódio/100 g de amostra).

O teor de proteína das diferentes marcas variou de 12,59% a 18,21%. As amostras T1 e T5 apresentaram o maior ($P < 0,05$) conteúdo de proteínas, não apresentando diferença significativa ($P > 0,05$) entre si. Por outro lado, as amostras T3 e T4 apresentaram o menor conteúdo de proteínas ($P < 0,05$), porém, sem diferença significativa ($P > 0,05$) entre si.

Em relação ao teor de gordura, os valores variaram entre 41,63% e 37,60%. O menor ($P < 0,05$) conteúdo de gordura foi encontrado nas amostras T1, T2 e T5, sem diferença ($P > 0,05$) entre eles, embora T1 e T3 também não apresentaram diferença ($P > 0,05$) entre si. O maior ($P < 0,05$) conteúdo de gordura foi encontrado em T4. De fato, vários estudos sugeriram que o teor de gordura da carne suína pode ser influenciado principalmente pela raça suína e pela alimentação (Pugliese et al., 2013; Raj et al., 2010).

O teor de umidade variou de 43,22% a 39,19%, apresentando similaridade ($P > 0,05$) entre as amostras T2, T3 e T4. As amostras de T5 apresentaram um menor ($P < 0,05$) conteúdo de umidade, quando comparado as amostras T2, T3 e T4. Entretanto, T5 apresentou um maior ($P < 0,05$) teor de umidade, quando comparado as amostras T1.

O teor de sódio variou de 0,56 a 1,98 mg de sódio/100 g de amostra. T3 apresentou o maior conteúdo de sódio, seguido de T2 e T4 que são similares ($P > 0,05$). T4 apresentou um menor conteúdo, quando comparado ao T2 e T3. Entretanto, T1 apresentou o menor conteúdo de sódio, quando comparado aos demais. É importante notar que as amostras com um maior conteúdo de sódio (T2, T3 e T4) também apresentaram os maiores conteúdos de umidade. A literatura relata que a adição de sal aos produtos cárneos

melhora a capacidade de retenção de água da matriz, o que provavelmente refletiu em um aumento do conteúdo de água dessas amostras.

Para o teor de cinzas, os resultados oscilaram entre 2,63% e 3,89%, com diferença significativa ($P > 0,05$) entre os tratamentos. T1 apresentou o menor conteúdo de sódio, quando comparado aos demais. T3 apresentou o maior conteúdo de sódio, seguido por T2 e T4 que são similares ($P > 0,05$). T4 apresentou um menor conteúdo, quando comparado ao T2 e T3.

7.3.3. Isotermas de sorção de água

A Figura 7.1 mostra a evolução no teor de umidade de equilíbrio das cinco amostras de bacon em função da atividade de água em sete temperaturas diferentes (2, 7, 12, 17, 22, 27 e 32 °C), ajustadas ao modelo de GAB. Segundo a classificação de Brunauer et al. (1940) as isotermas de sorção com as conformações obtidas podem ser classificadas como tipo III, característica de produtos alimentícios com elevados teores de proteínas ou sais (Erbaş et al., 2016).

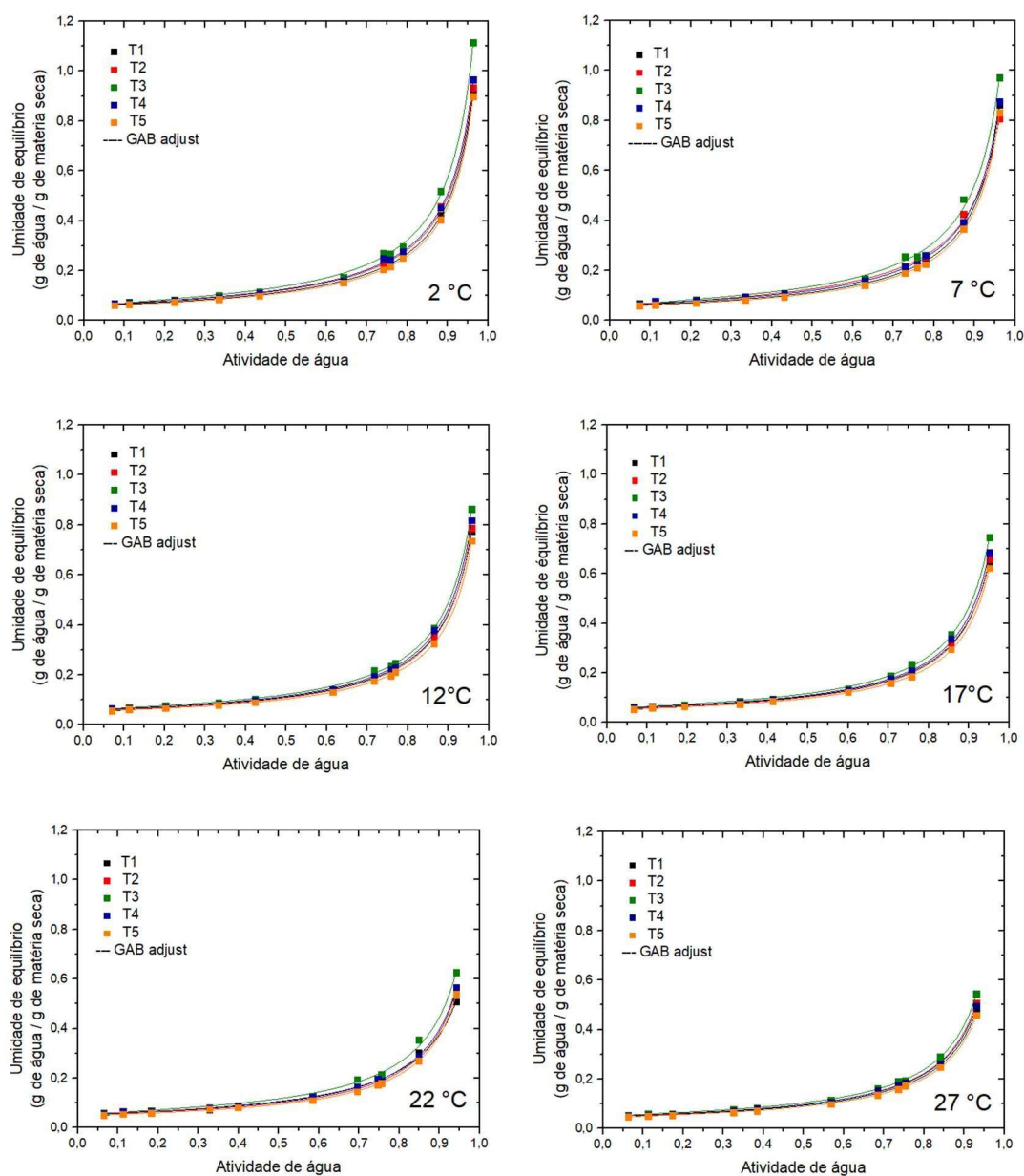
O comportamento do tipo III vem sendo comumente observado em carnes e produtos cárneos salgados, como carne de jacaré (Lopes Filho et al., 2002b), carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*) (Molina-Filho et al., 2006), carne bovina (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018), filé de pirarucu (*Arapaima gigas*) (Martins et al., 2015), carne suína (Comaposada et al., 2000) e presunto curado a seco (Betiol et al., 2020).

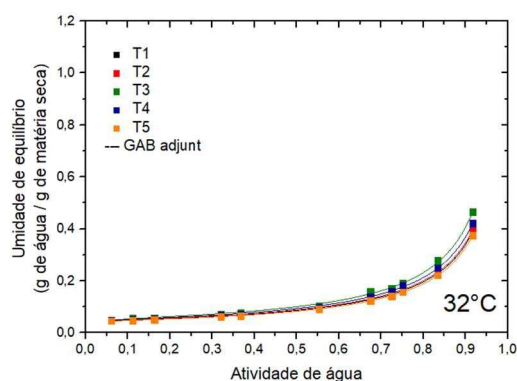
Aykın-Dinçer & Erbaş (2018) estudaram as isotermas de adsorção de água de fatias de carne bovina seca a vácuo com diferentes teores de sal (0, 5, 10, 15 e 20 g de NaCl/100 g de matéria seca). Os autores relataram que a isoterma das fatias de carne seca sem adição de sal apresentou um comportamento do tipo II de acordo com a classificação BET, mas a adição de sal levou esse comportamento a mudar para o tipo III, especialmente para amostras com 15 e 20 g de NaCl/100 g de matéria seca.

Além do formato característico de isoterma do tipo III, a Figura 7.1 também mostra um incremento linear constante na umidade de equilíbrio (X_{eq}) em $a_w < 0,75$, que são consideradas regiões de baixa e média a_w . Porém, à medida que a a_w atinge valores acima de 0,75, X_{eq} aumenta consideravelmente. Este comportamento pode ser explicado em razão de, abaixo deste ponto (a_w de 0,75), o cloreto de sódio (NaCl), está sob a forma de cristais, absorvendo pouca ou nenhuma água. Já em atividades de água superiores a 0,75 (seu ponto de saturação), a mobilidade da água disponível permite que o NaCl exerça sua habilidade hidrofílica, contribuindo para que a sorção de água aumente rapidamente,

conforme corroborado pelos dados obtidos. As mesmas observações foram feitas por (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018; Betiol et al., 2020) para as isotermas de carnes e produtos cárneos salgados.

Figura 7.1. Efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção de água de cinco amostras de bacon comerciais, ajustadas pelo modelo de GAB.





7.3.4. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção do bacon

A forma das isotermas de sorção de produtos cárneos depende de múltiplos fatores. Dentre eles, a temperatura tem sido apontada como capaz de afetar as características dessas curvas (Comaposada et al., 2000). A capacidade da temperatura de influenciar as isotermas de sorção é evidente, visto que, a atividade de água varia com a temperatura e ao longo de todo o processo produtivo, os alimentos são expostos a um significativo gradiente de temperatura (Al-Muhtaseb et al., 2002; McMinn & Magee, 2003).

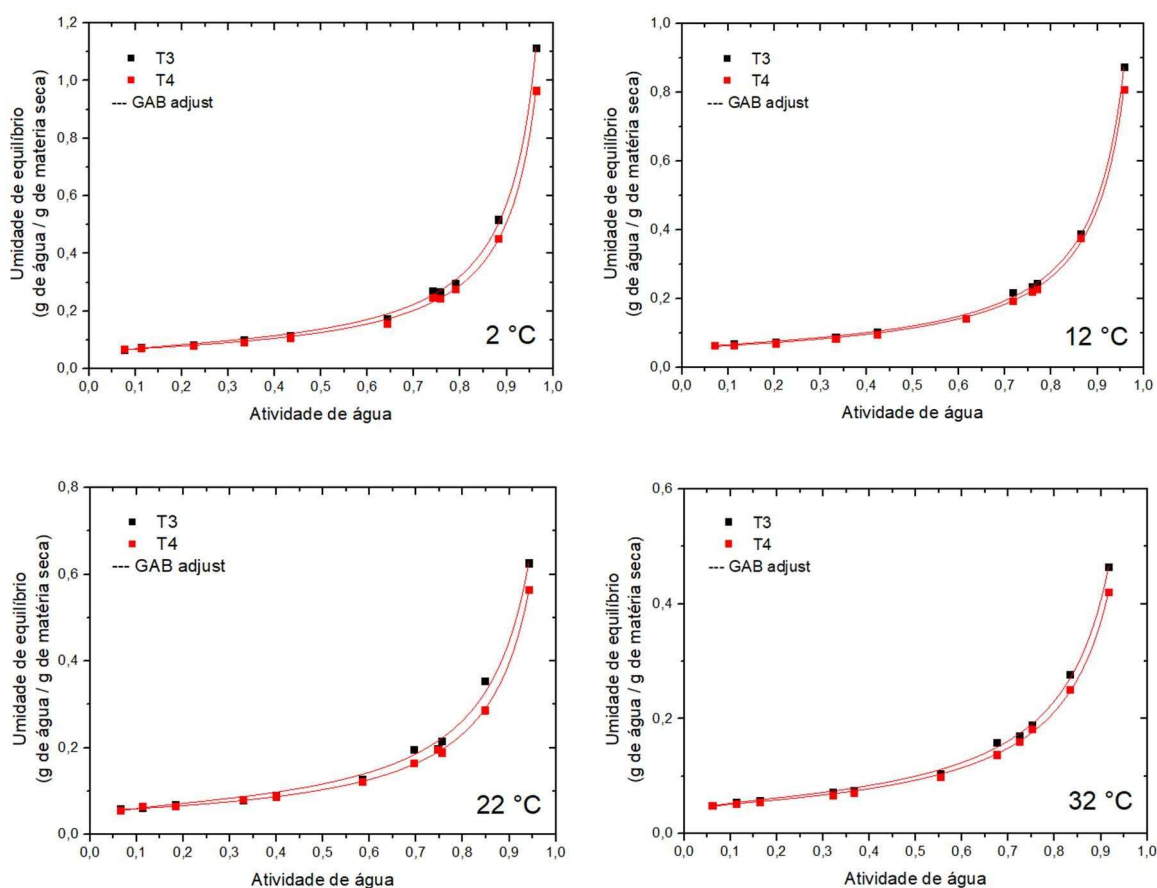
De maneira geral, o aumento da temperatura levou a uma queda considerável do teor de umidade de equilíbrio (Figura 1), podendo ser explicado pelo aumento da mobilidade das moléculas de água com o aumento da temperatura, que ocasiona uma diminuição dos sítios ativos de ligação das moléculas de água (Al-Muhtaseb et al., 2002; Cordeiro et al., 2006). Além disso, apesar de uma parte da água se ligar a grupos amino polares de proteínas presentes em produtos cárneos, formando a umidade da monocamada fortemente ligada à sua matriz do produto (Aykın & Erbaş, 2016; Barretto et al., 2018), um aumento na temperatura reduz a formação dessas ligações, resultando em uma diminuição da umidade da monocamada. Esses resultados são corroborados com aqueles observados por outros autores, principalmente para alimentos com alto teor proteico (Barretto et al., 2018; Clemente et al., 2009).

Na prática, esses resultados implicam que após o bacon ser removido da embalagem original e armazenado em um ambiente com alta umidade relativa, temperaturas de armazenamento mais baixas podem reduzir os fenômenos de sorção de água que podem ocorrer neste produto, auxiliando na manutenção de seu conteúdo de água e de seus aspectos sensoriais.

7.3.5. Efeito da composição química sobre isotermas de sorção do bacon

Outro fator que pode modificar as isotermas de sorção é a composição do produto, em especial a presença de solutos como os sais e os conteúdos de proteína e de gordura. Ao avaliar a composição das diferentes marcas comerciais de bacon (Tabela 7.2), nota-se diferenças principalmente entre os conteúdos de proteínas, gordura e sódio. T3 apresentou o maior conteúdo de sódio (1,98 mg de sódio/100 g de amostra) quando comparadas as demais, chegando a ter quase o dobro das amostras T2 e T4, cuja quantidade de sódio é a segunda mais alta entre as amostras. Para ilustrar os efeitos da composição química, a Figura 7.2 compara as isotermas de sorção de água das amostras T3 e T4 de bacon em diferentes temperaturas.

Figura 7.2. Isotermas de sorção de água das amostras T3 e T4 de bacon em diferentes temperaturas.

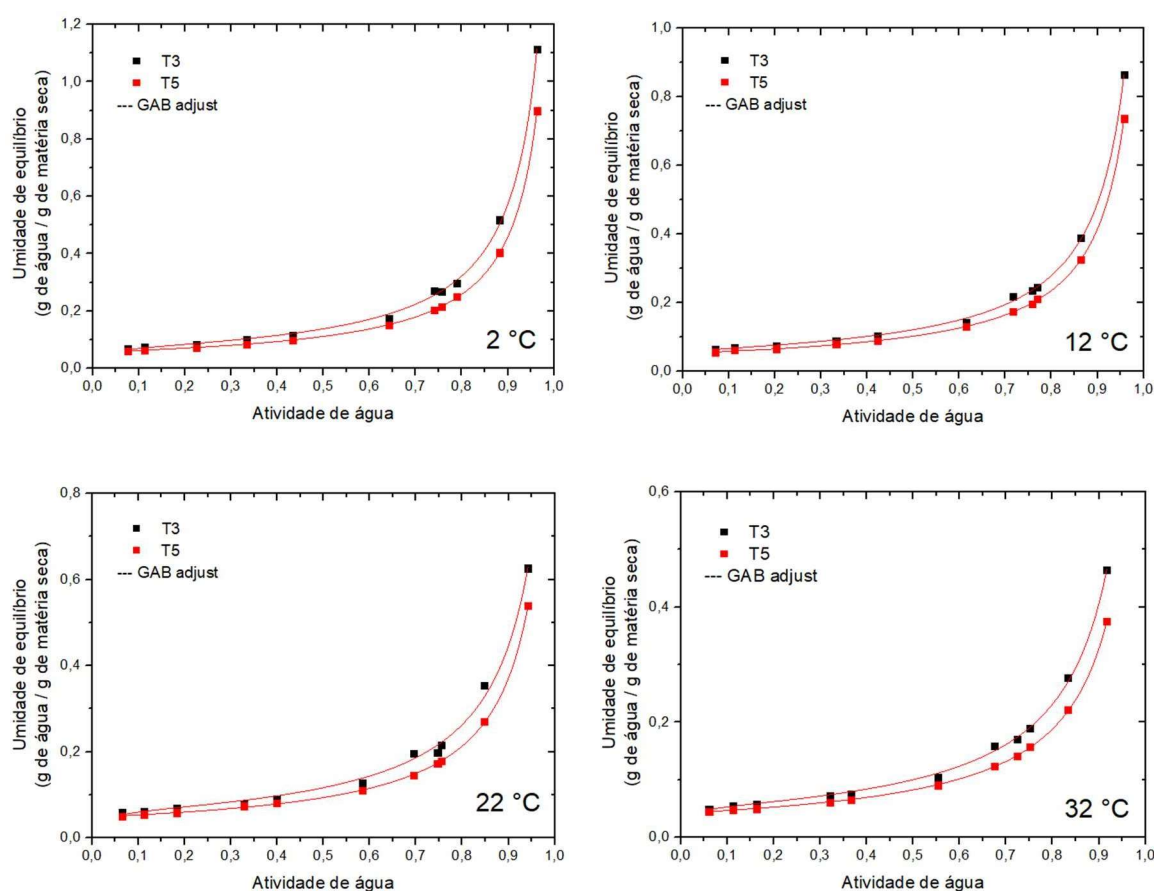


Comparando as amostras T3 e T4, nota-se que a principal diferença entre elas é o conteúdo de sódio (diferença de 0,95 mg de sódio/ 100 g de amostra), visto que o conteúdo de umidade e proteínas são similares ($P > 0,05$) entre essas amostras, com uma pequena diferença no conteúdo de gordura (diferença de 2,08 g de gordura/100 g de

amostra). Em regiões de atividade de água acima de 0.85, a Figura 7.2 mostra que T3 apresentou maiores umidades de equilíbrio (X_{eq}) em todas as temperaturas, quando comparado ao T4, que contém um menor conteúdo de sódio.

Para ilustrar com maior clareza os efeitos do conteúdo de sódio, a Figura 7.3 compara as isotermas de sorção de água da amostra T3, que contém o maior conteúdo de sódio (1,98 mg de sódio/ 100 g de amostra) e T5, que contém o menor conteúdo de sódio (0,56 mg de sódio/ 100 g de amostra) entre as amostras.

Figura 7.3. Isotermas de sorção de água das amostras T3 e T5 de bacon em diferentes temperaturas.

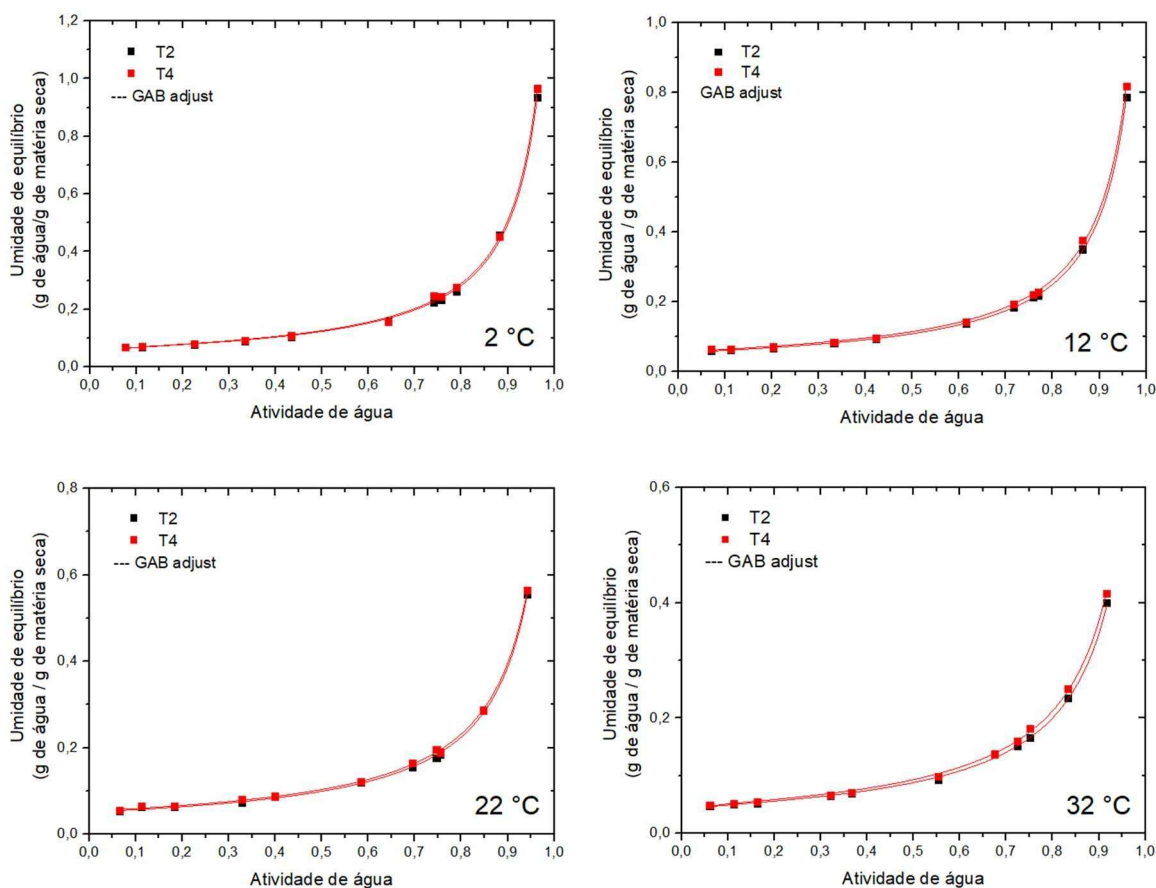


Em regiões de atividade de água acima de 0.7, T3 novamente apresentou maiores umidades de equilíbrio em todas as temperaturas, quando comparado a T5, que contém o menor conteúdo de sódio. Esse efeito pode ser explicado devido ao fato de que o sal em solução dá origem a Na e Cl^+ aumentando as interações coesivas entre a água e esses íons; estas ligações diminuem a pressão de vapor da água, explicando o efeito sobre o teor de NaCl na umidade de equilíbrio (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018). Esse fenômeno também

foi verificado por Aykın-Dinçer & Erbaş (2018) que examinaram o comportamento de diferentes concentrações de NaCl nas isotermas de sorção de fatias de carne bovina.

Além da influência do conteúdo de sódio nas propriedades de sorção de água, a influência da composição química em termos de teor de proteínas e gorduras também foi investigada. Para isso, a Figura 7.4 compara as isotermas das amostras T2 e T4. Em relação a composição química, T2 e T4 possuem um conteúdo de umidade, cinzas e sódio semelhantes ($P > 0,05$). Entretanto, essas amostras se diferem no conteúdo de gordura e de proteínas. T4 apresentou um menor ($P < 0,05$) conteúdo de proteínas e um maior ($P < 0,05$) conteúdo de gordura, quando comparado a T2.

Figura 7.4. Isotermas de sorção de água das amostras T2 e T4 de bacon em diferentes temperaturas.



Com base nos resultados apresentados na Figura 7.4, observou-se que o teor de umidade de equilíbrio das amostras T2 e T4 são semelhantes em todas as temperaturas estudadas, não apresentando um efeito significativo da composição das amostras em termos de proteínas e gorduras sobre as isotermas de sorção de água. Esses resultados

contrariam alguns estudos encontrados na literatura, que relataram que o teor de proteína afetou positivamente os valores de sorção de água. De fato, os grupos polares das proteínas possuem grande capacidade de se ligar a moléculas de água (Erbaş et al., 2016). Porém, este efeito pode não ter sido evidente provavelmente devido as alterações que podem sofrer as proteínas da carne como reticulação, desnaturação e interação de proteínas nativas ou desnaturadas com lipídios durante as etapas de processamento como salga, tambeamento e cozimento. Essas alterações podem levar a uma diminuição dos grupos polares disponíveis para se ligar à água em amostras de bacon.

7.3.2. Modelagem de isotermas de sorção de bacon

Os modelos matemáticos mencionados na Tabela 7.1 foram ajustados aos dados experimentais de sorção de água para o bacon a 2, 7, 12, 17, 22, 27 e 32 °C. Com base nos parâmetros de ajuste, todos os modelos descreveram com sucesso as isotermas de sorção de água, apresentando valores de R^2_{Adj} acima de 0,923 e RSME abaixo de 0,135. O Modelo GAB apresentou o melhor ajuste para todas as temperaturas, e o modelo Henderson o pior. Isso demonstra que o modelo GAB representa com maior precisão o mecanismo das isotermas de sorção em comparação com o modelo de Henderson. De fato, vários autores já relataram que o modelo GAB é o mais adequado para descrever as isotermas de sorção de carnes e seus produtos (Ahmat et al., 2014; Barretto et al., 2018; Betiol et al., 2020; Clemente et al., 2009; Lopes Filho et al., 2002).

A Tabela 7.3 apresenta os valores dos parâmetros estimados do modelo GAB (X_m , C e k), para cada amostra em cada temperatura avaliada, bem como os parâmetros estatísticos que indicam a qualidade do ajuste dos dados de sorção.

O parâmetro X_m corresponde a umidade da monocamada, que fornece informações úteis sobre o estado da água no produto (Staudt et al., 2013), e está relacionada com a estabilidade durante o armazenamento (Yan et al., 2012). Houve uma tendência de redução de X_m com o aumento da temperatura, que pode ser explicado pela redução do número de sítios ativos como consequência de mudanças físico-químicas induzidas pela temperatura (Al-Muhtaseb et al., 2002). Além disso, analisando-se o parâmetro X_m do modelo de GAB sob a ótica das diferentes composições das amostras, nota-se que T3 apresentou os maiores valores de X_m , quando comparado as outras amostras, em todas as temperaturas estudadas. Esse achado corrobora com as maiores umidades de equilíbrio encontradas para T3 em todas as temperaturas estudadas e que

provavelmente está relacionada com o maior conteúdo de sódio (Tabela 2) encontrado nesta amostra.

Tabela 7.3. Parâmetros de ajuste do modelo GAB para todas as amostras de bacon nas diferentes temperaturas.

	Temperatura (°C)						
	2	7	12	17	22	27	32
T1							
Xm	0,060	0,058	0,058	0,056	0,057	0,048	0,045
C	643,167	2985,785	93,891	92,816	67,307	159,657	675,036
k	0,971	0,970	0,966	0,961	0,944	0,965	0,965
R ²	0,999	0,999	0,998	0,997	0,995	0,999	0,999
x ²	2,719E ⁻⁰⁶	5,761E ⁻⁰⁶	8,793E ⁻⁰⁵	8,435E ⁻⁰⁵	7,737E ⁻⁰⁵	1,339E ⁻⁰⁵	2,719E ⁻⁰⁶
RMSE	0,0004	0,0044	0,0024	0,0023	0,0022	0,0009	0,0006
T2							
Xm	0,064	0,067	0,056	0,054	0,052	0,050	0,046
C	173,635	60,728	480,088	473,393	227,54	86,017	340,256
k	0,967	0,954	0,970	0,966	0,963	0,968	0,964
R ²	0,998	0,997	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999
x ²	8,534E ⁻⁰⁵	1,269E ⁻⁰⁴	4,483E ⁻⁰⁶	4,286E ⁻⁰⁶	1,997E ⁻⁰⁵	3,203E ⁻⁰⁵	8,617E ⁻⁰⁶
RMSE	0,0023	0,0028	0,0005	0,0005	0,0011	0,0014	0,0007
T3							
Xm	0,072	0,072	0,063	0,061	0,062	0,054	0,052
C	60,200	54,673	215,828	152,289	66,263	200,323	98,548
k	0,971	0,963	0,968	0,966	0,957	0,968	0,968
R ²	0,998	0,995	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998
x ²	1,156E ⁻⁰⁴	3,071E ⁻⁰⁴	4,639E ⁻⁰⁵	2,179E ⁻⁰⁵	1,818E ⁻⁰⁴	1,238E ⁻⁰⁵	2,848E ⁻⁰⁵
RMSE	0,0027	0,0044	0,0017	0,0012	0,0034	0,0009	0,0013
T4							
Xm	0,066	0,062	0,059	0,057	0,054	0,050	0,049
C	158,914	287,63	323,914	338,720	301,55	325,555	176,996
k	0,968	0,966	0,969	0,965	0,960	0,966	0,965
R ²	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
x ²	8,018E ⁻⁰⁵	2,773E ⁻⁰⁵	2,795E ⁻⁰⁵	2,628E ⁻⁰⁵	1,623E ⁻⁰⁵	1,618E ⁻⁰⁵	1,178E ⁻⁰⁵
RMSE	0,0023	0,0043	0,0013	0,0013	0,0010	0,0010	0,0008
T5							
Xm	0,057	0,055	0,053	0,050	0,049	0,046	0,043
C	570,319	725,276	432,87	541,98	647,408	266,833	750,433
k	0,972	0,971	0,969	0,967	0,966	0,967	0,966
R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
x ²	3,141E ⁻⁰⁶	2,102E ⁻⁰⁶	3,960E ⁻⁰⁶	4,165E ⁻⁰⁶	3,625E ⁻⁰⁶	4,631E ⁻⁰⁶	1,084E ⁻⁰⁶
RMSE	0,0004	0,0038	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	0,0002

7.4. Conclusão

As isothermas de sorção das amostras de bacon exibiram características das isothermas do tipo III, sendo o modelo GAB o mais adequado para descrever o comportamento dessas curvas nas diferentes temperaturas de armazenamento, dentre os cinco modelos testados. A capacidade de sorção das amostras demonstrou dependência da temperatura, diminuindo o teor de umidade de equilíbrio à medida que a temperatura aumentou. Além disso, verificou-se que a conteúdo de sódio também afetou significativamente as isothermas de sorção e a umidade da monocamada, apresentando maior teor de umidade de equilíbrio em amostras com maior conteúdo de sódio.

7.5. Referências

- AHMAT, T., BRUNEAU, D., KUITCHE, A., & AREGBA, A. W. (2014). Desorption isotherms for fresh beef: An experimental and modeling approach. **Meat Science**, 96(4), 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.12.009>
- AL-MUHTASEB, A. H., MCMINN, W. A. M., & MAGEE, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, 80(2), 118–128. <https://doi.org/10.1205/09603080252938753>
- AOAC. (2007). Association of Official Analytical Chemistry. In *In: Official methods of analysis to AOAC International*. (18th ed.).
- AYKIN, E., & ERBAŞ, M. (2016). Quality properties and adsorption behavior of freeze-dried beef meat from the Biceps femoris and Semimembranosus muscles. **Meat Science**, 121, 272–277. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2016.06.030>
- AYKIN-DİNÇER, E., & ERBAŞ, M. (2018). Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat Science**, 145, 114–120. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.06.007>
- BARRETTO, T. L., POLACHINI, T. C., BARRETTO, A. C. D. S., & TELIS-ROMERO, J. (2018). Water sorption isotherms of cooked hams as affected by temperature and chemical composition. **Food Science and Technology**, 39, 677–683.
- BARRETTO, T. L., POLLONIO, M. A. R., TELIS-ROMERO, J., & DA SILVA BARRETTO, A. C. (2018). Improving sensory acceptance and physicochemical properties by ultrasound application to restructured cooked ham with salt (NaCl) reduction. **Meat Science**, 145, 55–62. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.05.023>
- BETIOL, L. F. L., EVANGELISTA, R. R., SANCHES, M. A. R., BASSO, R. C., GULLÓN, B., LORENZO, J. M., BARRETTO, A. C. DA S., & TELIS-ROMERO, J. (2020). Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT**, 123, 109112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109112>

BLIGH, E. G., & DYER, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian journal of biochemistry and physiology**, 37(8), 911-917.

BRUNAUER, S., DEMING, L. S., DEMING, W. E., & TELLER, E. (1940). On the theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, 62(7), 1723–1732.

CLEMENTE, G., BON, J., BENEDITO, J., & MULET, A. (2009). Desorption isotherms and isosteric heat of desorption of previously frozen raw pork meat. **Meat Science**, 82(4), 413–418. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2009.02.020>

COMAPOSADA, J., ARNAU, J., & GOU, P. (2007). Sorption isotherms of salted minced pork and of lean surface of dry-cured hams at the end of the resting period using KCl as substitute for NaCl. **Meat Science**, 77(4), 643–648. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2007.05.017>

COMAPOSADA, J., GOU, P., & ARNAU, J. (2000). The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. **Meat Science**, 55(3), 291–295. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00154-0)

CORDEIRO, D. S., RAGHAVAN, G. S. V., & OLIVEIRA, W. P. (2006). Equilibrium Moisture Content Models for Maytenus ilicifolia Leaves. **Biosystems Engineering**, 94(2), 221–228. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2006.03.004>

DELGADO, A. E., & SUN, D. W. (2002). Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. **Journal of Food Engineering**, 51(2), 163–170. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00053-X)

DENG, S., LIU, Y., HUANG, F., LIU, J., HAN, D., ZHANG, C., & BLECKER, C. (2021). Evaluation volatile flavor compounds during storage time in bacon made by different pig breeds. **Food Chemistry**, 357, 129765. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129765>

DOMÍNGUEZ, R., PURRIÑOS, L., PÉREZ-SANTAESCOLÁSTICA, C., PATEIRO, M., BARBA, F. J., TOMASEVIC, I., CAMPAGNOL, P. C. B., & LORENZO, J. M. (2019). Characterization of Volatile Compounds of Dry-Cured Meat Products Using HS-SPME-GC/MS Technique. **Food Analytical Methods**, 12(6), 1263–1284. <https://doi.org/10.1007/S12161-019-01491-X/TABLES/4>

ERBAŞ, M., AYKIN, E., ARSLAN, S., & DURAK, A. N. (2016). Adsorption behaviour of bulgur. **Food Chemistry**, 195, 87–90. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.06.050>

FREITAS, M. L. F., POLACHINI, T. C., DE SOUZA, A. C., & TELIS-ROMERO, J. (2016). Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated Parmesan cheese. **International Journal of Food Science and Technology**, 51(1), 250–259. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12969>

GAN, X., LI, H., WANG, Z., EMARA, A. M., ZHANG, D., & HE, Z. (2019). Does protein oxidation affect proteolysis in low sodium Chinese traditional bacon processing? **Meat Science**, 150, 14–22. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.10.007>

JIMÉNEZ-COLMENERO, F., VENTANAS, J., & TOLDRÁ, F. (2010). Nutritional composition of dry-cured ham and its role in a healthy diet. **Meat Science**, 84(4), 585–593. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2009.10.029>

JIN, G., HE, L., YU, X., ZHANG, J., & MA, M. (2013). Antioxidant enzyme activities are affected by salt content and temperature and influence muscle lipid oxidation during dry-salted bacon processing. **Food Chemistry**, 141(3), 2751–2756. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2013.05.107>

KABIL, E., AKTAŞ, N., & BALCI, E. (2012). Effect of sodium chloride, sodium nitrite and temperature on desorption isotherms of previously frozen beef. **Meat Science**, 90(4), 932–938. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.11.035>

LOPES FILHO, J. F., ROMANELLI, P. F., BARBOZA, S. H. R., GABAS, A. L., & TELIS-ROMERO, J. (2002a). Sorption isotherms of alligator's meat (*Caiman crocodilus yacare*). **Journal of Food Engineering**, 52(2), 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00105-4)

LORIDO, L., VENTANAS, S., AKCAN, T., & ESTÉVEZ, M. (2016). Effect of protein oxidation on the impaired quality of dry-cured loins produced from frozen pork meat. **Food Chemistry**, 196, 1310–1314. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.092>

MARTINS, M. G., MARTINS, D. E. G., & PENA, R. DA S. (2015). Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. **LWT - Food Science and Technology**, 62(1), 144–151. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.01.010>

MCMINN, W. A. M., & MAGEE, T. R. A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. **Journal of Food Engineering**, 60(2), 157–165. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0)

MERLO, T. C., DA CRUZ ANTONIO, J., SAVIAN, T. V., VILLEGAS, C., DARGELIO, M. D. B., DA SILVA PINTO, J. S., ALENCAR, S. M. DE, RODRIGUES, A. L. R., SALDAÑA, E., & CONTRERAS-CASTILLO, C. J. (2020). Effect of the smoking using Brazilian reforestation woods on volatile organic compounds, lipid oxidation, microbiological and hedonic quality of bacons during shelf life. **Meat Science**, 164, 108110. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108110>

MOLINA-FILHO, L., PEDRO, M. A. M., TELIS-ROMERO, J., & BARBOZA, S. H. R. (2006). Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*). **Food Science and Technology**, 26, 453–458.

PUGLIESE, C., SIRTORI, F., ACCIAIOLI, A., BOZZI, R., CAMPODONI, G., & FRANCI, O. (2013). Quality of fresh and seasoned fat of Cinta Senese pigs as affected by fattening with chestnut. **Meat Science**, 93(1), 92–97. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2012.08.006>

RAJ, S., SKIBA, G., WEREMKO, D., FANDREJEWSKI, H., MIGDAŁ, W., BOROWIEC, F., & POŁAWSKA, E. (2010). The relationship between the chemical composition of the carcass and the fatty acid composition of intramuscular fat and backfat

of several pig breeds slaughtered at different weights. **Meat Science**, 86(2), 324–330. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2010.04.037>

SALDAÑA, E., SOLETTI, I., MARTINS, M. M., MENEGALI, B. S., MERLO, T. C., SELANI, M. M., TEIXEIRA, A. C. B., DA SILVA, F. G., & CONTRERAS-CASTILLO, C. J. (2019). Understanding consumers' dynamic sensory perception for bacon smoked with different Brazilian woods. **Meat Science**, 154, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.04.006>

STAUDT, P. B., TESSARO, I. C., MARCZAK, L. D. F., SOARES, R. D. P., & CARDOZO, N. S. M. (2013). A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. **Journal of Food Engineering**, 118(3), 247–255. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.04.013>

TOLDRA, F. (2006). The role of muscle enzymes in dry-cured meat products with different drying conditions. **Trends in Food Science and Technology**, 17(4), 164–168. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.007>

YAN, H., CAI, B., CHENG, Y., GUO, G., LI, D., YAO, X., NI, X., PHILLIPS, G. O., FANG, Y., & JIANG, F. (2012). Mechanism of lowering water activity of konjac glucomannan and its derivatives. **Food Hydrocolloids**, 26(2), 383–388. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2011.02.018>

8 CONCLUSÕES GERAIS

Como principais conclusões obtidas da presente tese doutorais, pode-se destacar nos diferentes capítulos apresentados:

8.1 Capítulo I – Revisão bibliográfica

- A valorização da barriga suína para produção de *bacon* é amplamente empregada no mundo todo; entretanto, pouco se estuda sobre as tecnologias que visam acelerar os métodos convencionais – caso do ultrassom de alta intensidade;
- Os diferentes processos de salga são complexos, principalmente quando se trata de matérias-primas heterogêneas como o próprio caso da barriga suína;
- Além das propriedades físicas, químicas e sensoriais relacionadas ao processo de salga, a modelagem matemática da cinética de processo mostra-se como uma etapa inicial essencial ao desenvolvimento e comparação de uma nova aplicação frente os métodos convencionais;

8.2 Capítulo II – Propriedades físicas da barriga suína

- O teor de umidade das amostras de barriga suína diminuiu na medida em que se incorporou sal durante a desidratação osmótica – como consequência do aumento da concentração de NaCl – e durante a própria secagem;
- A espessura da barriga suína foi reduzida quando aumentou-se a concentração de NaCl, provavelmente devido à uma contração do tecido cárneo, levando a uma queda no volume global das amostras;
- O volume e a espessura puderam ser representados por modelos matemáticos lineares em função das variáveis significativas a 95% de confiança;

8.3 Capítulo III – Salga úmida de barriga suína assistida por ultrassom

- Os modelos de Peleg e de Weibull apresentaram os maiores coeficientes de determinação e menores erros residuais ao se ajustarem aos dados experimentais;
- Por possuir uma solução matemática mais simples, o modelo de Peleg foi escolhido para estimar os parâmetros cinéticos do processo a serem discutidos;
- O aumento da temperatura da salmoura aumentou a perda de água, o ganho de sólidos (NaCl) e o próprio teor de sódio na barriga suína;

- O emprego de agitação mecânica ou ultrassom de alta intensidade resultou em um aumento nas taxas de perda de água, ganho de sólidos e teor de sódio das amostras quando comparados ao processo de salga estática;
- Ao se comparar o uso de agitação mecânica e ultrassom, o segundo mostrou-se mais eficiente na redução do tempo de salga úmida;

8.4 Capítulo IV – Isotermas de sorção do bacon acabado

- As isotermas de sorção das amostras de bacon comerciais apresentaram comportamento sigmoidal, típico das isotermas do tipo II;
- O modelo GAB mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento dessas curvas nas diferentes temperaturas de armazenamento;
- A capacidade de sorção das amostras demonstrou dependência da temperatura, diminuindo o teor de umidade de equilíbrio na medida em que a temperatura do meio aumentou;
- O conteúdo de NaCl teve efeito significativo sobre a umidade da monocamada, apresentando maiores valores em amostras com maior conteúdo de sódio;

Ao se fazer uma análise geral dos resultados obtidos na presente tese, pode-se afirmar que o emprego do ultrassom pode ser considerado para acelerar o processo de salga de barriga suína para produção de bacon. Além disso, foi observado que variações nas propriedades físicas na medida em que houve incorporação de sal ou perda de umidade nas amostras – devendo-se levar em consideração durante o desenvolvimento das operações. Tais alterações no conteúdo de sal, assim como a temperatura do meio, também se mostraram significantes para influenciar as propriedades de sorção de água no bacon acabado. Estas informações permitirão aplicar condições mais favoráveis para o aumento da vida de prateleira do bacon.