



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Mariane Wolf

**Modificação das propriedades físico-químicas de lombo suíno (*M. longissimus dorsi*)
durante o assamento em forno com temperatura controlada**

Florianópolis, SC
2022

Mariane Wolf

**Modificação das propriedades físico-químicas de lombo suíno (*M. longissimus dorsi*)
durante o assamento em forno com temperatura controlada**

Proposta de tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de doutor em Engenharia de Alimentos
Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo.
Coorientador: Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi.

Florianópolis, SC

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Wolf, Mariane

Modificação das propriedades físico-químicas de lombo suíno (M. longissimus dorsi) durante o assamento em forno com temperatura controlada / Mariane Wolf ; orientador, João Borges Laurindo, coorientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi, 2022.
140 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Processo de assamento.
3. Propriedades físico-químicas de carne assada. 4. Lombo suíno. I. Laurindo, João Borges. II. Carciofi, Bruno Augusto Mattar. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

Mariane Wolf

**Modificação das propriedades físico-químicas de lombo suíno (*M. longissimus dorsi*)
durante o assamento em forno com temperatura controlada**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. João Borges Laurindo – Presidente – UFSC

Dra. Marise Aparecida Rodrigues Polônio – Membro externo - UNICAMP

Dr. Paulo José do Amaral Sobral – Membro externo - USP

Dr. Marcelo Lanza – Membro interno – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutora em Engenharia de Alimentos.

Profa. Dra Sandra Regina Salvador Ferreira
Coordenadora do Programa

Prof. Dr. João Borges Laurindo
Orientador

Florianópolis, 2022

**“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”**

Arthur Schopenhauer (1788-1860)

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a força, proteção e luz divina em meu caminho. Ao meu anjo da guarda que me guardou em momentos inesperados para alcançar esta conquista.

Aos meus pais, Darli e Geraldo, pelo suporte incondicional fornecido em todos os momentos. Muito obrigada por me apoiarem em minhas escolhas.

Às minhas irmãs Tayara e Sintia pelo carinho, amizade e torcida.

À minha saudade diária, minha doce sobrinha Laura, que mesmo à distância, tornou este período mais leve com sua alegria e seu amor incondicional.

Ao Tiago pelo carinho, companheirismo, compreensão e incentivo em todos os momentos. Você é um dos maiores exemplos de competência e integridade.

A todos os colegas e amigos do laboratório pelo suporte emocional e profissional. Obrigada pelas trocas de conselhos, conhecimentos, amizades e boa convivência que facilitaram essa fase. Em especial à Sandra, Jaizia, Thayná, Ivan, João Pedro, Raquel, Amanda, Thayla, Fabíola e Zélia. Muito obrigada pelas amizades que construímos.

Ao meu orientador, João, pelos ensinamentos, pela confiança, oportunidade, conselhos e dedicação ao desenvolvimento desta tese.

Ao meu grupo de projeto em parceria com a Whirlpool, Prof. João, Prof. Bruno, Jhony e João Pedro pela oportunidade de construir conhecimento com excelentes profissionais.

Ao laboratório PROFI onde desenvolvi a maioria dos experimentos, pelo suporte e condições para realização deste trabalho. À Whirlpool pelo financiamento de matéria-prima utilizada nos experimentos.

À Central de Análises do EQA, LABCAL, LIEB, LCP pela disponibilidade de equipamentos e suporte necessários para realização das análises.

À banca examinadora pela disposição, correções e sugestões.

À UFSC e ao PPGEAL pela oportunidade de realizar este trabalho. A CAPES pelo apoio financeiro da bolsa de estudos. Aos professores do PPGEAL pelos ensinamentos.

A todos que me incentivaram, contribuíram e vivenciaram comigo cada etapa da construção do meu trabalho.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi determinar experimentalmente a evolução temporal das propriedades físico-químicas de lombo suíno durante o assamento em forno com temperatura controlada, e propor modelos matemáticos para a evolução destas propriedades em função da temperatura e umidade. O sistema experimental é formado por um forno adaptado, dotado de termopares posicionados para medir a distribuição de temperaturas dentro da cavidade e de uma célula de carga, ligados a um sistema de aquisição de dados. O sistema de controle empregado no forno mostrou bom desempenho para obtenção dos dados experimentais precisos e reprodutíveis. O efeito da temperatura de assamento (180, 200 e 220 °C) nas propriedades das amostras assadas foi avaliado a partir: i) da evolução dos perfis de temperatura, ii) da variação de massa, iii) da variação da cor (a^* , b^* , L^* e ΔE^*), iv) da formação de crosta, v) de indicadores da reação de Maillard e de reações de escurecimento por oxidação lipídica, vi) das perdas de componentes durante o cozimento, vii) da força de cisalhamento em texturômetro, viii) da suculência, ix) dos encolhimentos direcionais e de volume, x) da composição centesimal das amostras assadas. Também foram realizadas análises de calorimetria de varredura diferencial nas amostras de lombo suíno assado, além da determinação da capacidade de retenção de água (CRA) e módulo de elasticidade (G'). A desnaturação gradual das proteínas, a redução de CRA e o aumento de G' com a temperatura foram diretamente associados à evolução das propriedades físicas de lombo suíno assado. Além disso, no intervalo de temperatura de 63,91 a 93,56 °C ocorreram as mudanças estruturais mais significativas na carne. O aumento da temperatura e do tempo de assamento intensificou as perdas de massa, reduzindo a suculência e aumentando a força de cisalhamento durante o corte, o encolhimento e a concentração de proteína e gordura. Quanto à mudança de cor superficial, primeiramente ocorre a desnaturação de proteínas heme, seguida de um intervalo com temperaturas na faixa de 60 a 80 °C, com acúmulo de umidade superficial, fenômeno que inibiu o avanço da etapa de escurecimento da crosta. Em seguida, ocorreu a evaporação da umidade na crosta, com posterior aumento de temperatura e consequente aumento das taxas de reações de escurecimento, com aumento dos valores dos parâmetros a^* e b^* e diminuição do parâmetro L^* . O escurecimento superficial das amostras foi acompanhado do acúmulo de melanoidinas, composto marrom escuro das reações de Maillard e oxidação lipídica, confirmado por análises espectrais de UV-Vis e FTIR aplicadas em crostas assadas e nos extratos aquosos (pigmento marrom) das crostas. O aumento da temperatura causou aumento na intensidade das bandas associadas a compostos indicadores de escurecimento (carbonila, metil e metileno). Além disso, a aglomeração de proteínas nas crostas de lombo suíno foi confirmada. O perfil de varredura UV-Vis e o espectro FTIR do pigmento marrom extraído da crosta assada está de acordo com os padrões de melanoidinas e melaninas encontrados na literatura, além de mostrar bandas características de compostos iniciais e intermediários da reação de Maillard. Portanto, este minucioso trabalho experimental contribui para uma compreensão da evolução de importantes propriedades físicas do corte de lombo suíno durante o processo de assamento. As representações matemáticas das variações das diferentes propriedades físicas e mudanças bioquímicas ocorridas durante o assamento são originais. Além disso, as equações resultantes serão fundamentais para a modelagem matemática e a simulação numérica de processos de assamento de lombo suíno em diferentes condições, para o desenvolvimento de alternativas operacionais e aprimoramento de fornos.

Palavras-chave: Lombo suíno. Assamento. Textura e suculência. Cor. Modelos matemáticos.

ABSTRACT

This study aims to experimentally determine the temporal evolution of the physicochemical properties of pork loin during roasting in an oven at temperature-controlled and propose mathematical models for the evolution of these properties as a function of temperature and moisture. The experimental system is formed by an adapted oven equipped with thermocouples positioned to measure the temperature distribution inside the cavity and a load cell connected to a data acquisition system. The control system used in the oven showed good performance in obtaining accurate and reproducible experimental data. The effect of the roasting temperature (180, 200, and 220 °C) on the properties of the roasted samples was evaluated from: i) the evolution of the temperature profiles, ii) the mass variation, iii) the color variation (a^* , b^* , L^* and ΔE^*), iv) crust formation, v) Maillard reaction indicators and browning reactions by lipid oxidation, vi) component losses during cooking, vii) shear force in texturometer, viii) of the succulence, ix) of the directional and volume shrinkages, x) of the proximate composition of the roasted samples. Differential scanning calorimetry analyzes were also performed on the roasted pork loin samples and the determination of the water holding capacity (WRC) and modulus of elasticity (G'). The gradual denaturation of proteins, the reduction of WRC, and the increase of G' with temperature were directly associated with the evolution of the physical properties of roasted pork loin. Furthermore, in the temperature range from 63.91 to 93.56 °C, the meat's most significant structural changes occurred. The increased temperature and roasting time intensified the mass losses, reducing juiciness and increasing shear force during cutting, shrinkage, and protein and fat concentration. As for the surface color change, the denaturation of heme proteins occurs, followed by an interval with temperatures in the range of 60 to 80 °C, with surface moisture accumulation. This phenomenon inhibited the advance of the browning stage of the crust. Then, the moisture evaporation in the crust took place, with a subsequent increase in temperature and the associated increase in the browning reaction rates, with an increase in the values of parameters a^* and b^* and a decrease in the parameter L^* . The surface browning of the samples was accompanied by the accumulation of melanoidins, a dark brown compound of Maillard reactions and lipid oxidation, confirmed by UV-Vis and FTIR spectral analyzes applied to roasted crusts and aqueous extracts (brown pigment) of the crusts. The increase in temperature caused an increase in the intensity of the bands associated with browning indicator compounds (carbonyl, methyl, and methylene). In addition, protein agglomeration in pork loin crusts was confirmed. The UV-Vis scanning profile and the FTIR spectrum of the brown pigment extracted from the roasted crust agree with the patterns of melanoidins and melanins found in the literature, in addition to showing characteristic bands of initial and intermediate compounds of the Maillard reaction. Therefore, this detailed experimental work contributes to understanding the evolution of important physical properties of pork loin cut during the roasting process. The mathematical representations of variations in the different physical properties and biochemical changes during roasting are original. Furthermore, the resulting equations will be fundamental for the mathematical modeling and numerical simulation of pork loin roasting processes under different conditions for developing operational alternatives and oven improvement.

Keywords: Pork loin. Roasting. Texture and succulence. Color. Mathematical models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma do documento de tese.....	20
Figura 2 - Diagrama estrutural muscular e composição interna da fibra muscular.....	26
Figura 3 - Fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante o cozimento de lombo suíno em uma assadeira em um forno com convecção.	29
Figura 4 – Fotografia ilustrando o padrão dos lombos suínos utilizados nos experimentos.	49
Figura 5 - Representação do método de preparação de amostras de lombo suíno para análise. Etapa 1: divisão do lombo inteiro com cortes longitudinais de 3 cm de espessura (definindo a altura da amostra); Etapa 2: corte paralelo às fibras musculares (definindo a largura da mostra). Etapa 3: Aparas laterais do corte obtido na etapa anterior (definindo o comprimento). Etapa 4: amostra com dimensões padronizadas e certificadas.	51
Figura 6 - (a) Vista externa e (b) vista da entrada da cavidade do forno mufla adaptado.....	52
Figura 7 – (a) Esquema da posição dos termopares e (b) cavidade do forno mufla adaptado.	53
Figura 8 – Amostra com dimensões padronizadas e certificadas para o assamento.	54
Figura 9 - (a) Adaptação de termopar com agulha e revestimento isolante; (b) Posição dos termopares na amostra de lombo suíno.	55
Figura 10 - Representação esquemática do sistema de pesagem.....	56
Figura 11 - Esquema de extração de subamostras para determinação das umidades locais médias.....	57
Figura 12 - Amostras de lombo suíno crua e assadas liofilizadas e moídas.....	59
Figura 13 - Classificação de unidades de lombo suíno baseada em: (a) umidade (b.u) (■); (b) parâmetro de cor L* (●) e (c) pH (▲); valores médios de cada parâmetro (- - -).....	62
Figura 14 - Validação das temperaturas da cavidade do forno durante o assamento: (a) Posição de termopares na cavidade do forno; (b) Termopar 1 (Parede superior esquerda); (c) Termopar 2 (Parede superior direita); (d) Termopar 3 (Parede lateral esquerda); (e) Termopar 4 (Parede lateral direita); (f) Termopar 5 (Parede inferior); (g) Termopar 6 (Parede traseira) nas temperaturas de 180 (●), 200 (●) e 220 °C (●). <i>Setpoint</i> do controlador a 180 (●), 200 (●) e 220 °C (●).....	64
Figura 15 - Posição dos termopares na amostra assada: (a) Configuração experimental e (b) Localização dos termopares.	65
Figura 16 - Perfis de temperatura na superfície da amostra (●), no centro da amostra (●) e temperatura do ar (eixo direito) dentro do forno (●) durante o assamento de lombo suíno a: (a) 180 °C; (b) 200 °C; (c) 220 °C e (d) comparação dos perfis de temperatura representativos.	66

Figura 17 - (a) Perfis de umidade global em diferentes temperaturas; Umidades locais a (b) 180 °C, (c) 200 °C e (d) 220 °C durante assamento de lombo suíno.	68
Figura 18 - Cor superficial de lombo suíno durante o assamento a 180, 200 e 220 °C: (a) sequência de fotografias registradas em diferentes tempos de assamento; (b) L* (preto para branco); (c) a* (verde para vermelho); (d) parâmetro b* (azul para amarelo) e evolução total da cor total da cor (ΔE^*).	70
Figura 19 - Relação entre a temperatura da crosta (°C) e (a) parâmetro L*; (b) parâmetro a* e (c) parâmetro b* e (d) evolução total da cor (ΔE^*); (-) Modelo ajustado e (-) relação em função dos parâmetros L*, a* e b*.	72
Figura 20 - Relação entre a umidade da crosta (°C) e (a) parâmetro L*; (b) parâmetro a* e (c) parâmetro b* e (d) evolução total da cor (ΔE^*).	74
Figura 21 – Caracterização de formação de crosta de lombo suíno assado por 40 min (a) espessura em função da temperatura, (b) espessura em função da umidade (■) (eixo esquerdo) e temperatura da crosta (●) (eixo direito), (c) seção transversal de amostra assada a 220 °C e (d) ilustração da formação da crosta em carne crua e assada a 180, 200 e 220 °C.	75
Figura 22 – Espectro de FTIR-ATR de crosta de lombo suíno (■) cru e assado por 40 min a (■) 180, (■) 200 e (■) 220 °C.	76
Figura 23 - Espectro UV-Vis de pigmento marrom de lombo suíno cru (■) e assado a 20 (■) e 40 min (■) a 180°C; a 20 (■) e 40 min (■) a 200°C e a 20 (■) e 40 min (■) a 220 °C.	80
Figura 24 - Espectros FTIR de pigmento marrom de lombo suíno cru (■) e assado por 40 min a 180 (■), 200 (■) e 220 °C (■).	82
Figura 25 - Esquema de dimensionamento do cuboide retangular de lombo suíno: (a) dimensões e direções avaliadas na amostra e (b) exemplo de obtenção de medidas para compor valor médio de altura da amostra.	91
Figura 26 - Capacidade de retenção de água (CRA) em função da temperatura para lombo suíno.	94
Figura 27 - Modulo de elasticidade, G' (kPa)(●) (eixo esquerdo), e ângulo de fase, ϕ (°)(▲)(eixo direito), para lombo suíno <i>M. Longissimus dorsi</i> em função da temperatura de cozimento. Valores experimentais indicados por símbolos e valores estimados pela linha preta.	96
Figura 28 - DSC representativo de lombo suíno cru registrado a uma taxa de aquecimento de 5 °C·min ⁻¹	97

Figura 29 - (a) Perdas pelo cozimento (PC) (%); (b) Sólidos solúveis perdidos (SSP) (%) e (c) fotografias ilustrando o acúmulo de sólidos solúveis nas formas durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.	98
Figura 30 – Força de cisalhamento durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.....	100
Figura 31 – Suculência durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas....	103
Figura 32 - Encolhimento das dimensões de lombo suíno em função do tempo de assamento a (a) 180, (b) 200 e (c) 220 °C; (d) encolhimento após 40 min de assamento em função da temperatura.	105
Figura 33 – Encolhimento de volume durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.....	107
Figura 34 - Composição centesimal em base úmida de lombo suíno cru (■) e assado a (■) centro geométrico a 75 °C e (■) 40 min nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C: (a) Umidade; (b) Proteína; (c) Gordura e (d) Cinzas.....	109
Figura 35 - Composição centesimal em base seca de lombo suíno cru (■) e assado por (■) centro geométrico a 75 °C e (■) 40 min nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C: (a) Umidade; (b) Proteína; (c) Gordura e (d) Cinzas.....	111
Figura 36 – Resultados experimentais de valor energético ($\text{kcal}\cdot 100\text{g}^{-1}$) em função do tempo e temperatura de assamento.....	113
Figura 37 - Relação entre a temperatura do centro e (a) perdas por cozimento (PC), (b) perdas de sólidos solúveis (SSP), (c) Suculência, (d) Força de cisalhamento (FCis), (e) Encolhimento de volume (Encolhimento), (f) Valor energético e curvas ajustadas (linhas pretas).	114
Figura 38 - Relação entre a umidade global e (a) perdas por cozimento (PC), (b) perdas de sólidos solúveis (SSP), (c) Suculência, (d) Força de cisalhamento (FCis) e (e) Encolhimento de volume (Encolhimento), (f) Valor energético e curvas ajustadas (linhas pretas).....	116
Figura 39 - Diagramas de dispersão do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre as propriedades físicas de lombo suíno assado.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Literatura sobre avaliação de propriedades físico-químicas de lombo suíno (<i>M. longissimus dorsi</i>) assado	33
Tabela 2 - Descrição das características dos perfis de temperatura obtidos no assamento de lombo suíno.	67
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos ajustados aos parâmetros de cor (Y^*)(L^* , a^* e b^*) em função da temperatura (T_{Sup}) nas Figuras 19 e seus coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio ($RMSE$).	73
Tabela 4 - Parâmetros dos modelos ajustados aos dados relacionados na Figura 36 e 37 e seus coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio ($RMSE$).	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
ATR	Refletância total atenuada
b.s	Base seca
b.u	Base úmida
CIE	<i>Commision Internationale de L'Éclairage</i>
CRA	Capacidade de Retenção de Água
DFD	<i>Dark, Firm and Dry</i>
DSC	Calorímetro Diferencial de Varredura
Encolhimento	Encolhimento de volume
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FC	Convecção forçada
FC / S	Convecção forçada combinado com vapor
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
Fcisa	Força de cisalhamento
G'	Módulo de Elasticidade
HMF	Hidroximetilfurfural
KBr	Brometo de potássio
LABCAL	Laboratório de Análises
LCP	Laboratório de Controle e Processos de Polimerização
LiEB	Laboratório de Engenharia Biológica
M	Músculo
NC	Convecção natural
NC / PP	Convecção natural em embalagem plástica
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PC	Perdas de cozimento
PGAs	Produtos de Glicação Avançada
PID	Proporcional-Integrativo-Derivativo
PSE	<i>Pale, Soft e Exudative</i>
R ²	Coefficientes de determinação
RM	Reação de Maillard
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
SSP	Sólidos Solúveis Perdidos
T _i	Temperatura interna central
T _{Sup}	Temperatura da superfície
T _{Centro}	Temperatura do centro
TBCA	Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UV-Vis	Espectroscopia no ultravioleta visível
U _{global}	Umidade global
U _{Sup}	Umidade da superfície
VE	Valor energético

LISTA DE SÍMBOLOS

a^*	Cromaticidade de a^*	
b^*	Cromaticidade de b^*	
CRA	Capacidade de Retenção de Água	b.s
$E_{\text{Direção}} (\%)$	Coefficiente de encolhimento em determinada direção	%
E_{Vap}	Coefficiente de encolhimento do volume aparente	%
G'	Módulo de Elasticidade	kPa
k	Taxa máxima de aumento da função	
L^*	Luminosidade	
ΔE^*	Evolução total da cor	
PC	Perdas de Cozimento	%
r	Coefficiente de correlação linear de Pearson	
SSP	Sólidos Solúveis Perdidos	%
T_{Sup}	Temperatura da superfície	°C
T_C	Ponto de inflexão da curva	°C
V_{ap}	Volume aparente da amostra	cm ³
Y^*	Evolução de parâmetro de cor	
Y_o^*	Assíntota inferior da curva	
Y_{inf}^*	Assíntota superior da curva	

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL	19
.....	19
ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	20
CAPÍTULO 1	21
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo Geral	22
1.1.2 Objetivos Específicos.....	22
CAPÍTULO 2	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 CARNE	24
2.1.1 Carne suína no panorama econômico	24
2.1.2 Composição e estrutura da carne.....	25
2.1.3 Qualidade da carne <i>in natura</i>	27
2.2 PROCESSO DE ASSAMENTO EM FORNO	27
2.2.1 Dinâmica do processo de assamento em forno	27
2.2.2 Influência do assamento na qualidade da carne.....	30
2.3 QUALIDADE DA CARNE ASSADA	36
2.3.1 Capacidade de retenção de água de carne assada	36
2.3.2 Perdas por cozimento.....	36
2.3.3 Força de cisalhamento.....	37
2.3.4 Suculência.....	39
2.3.5 Encolhimento	39
2.3.6 Propriedades estruturais de carne assada.....	40
2.3.7 Modificação da cor da carne durante o cozimento	41
2.3.7.1 <i>Mudança de cor de carne assada</i>	41

2.3.7.2	<i>Indicadores de Reação de Maillard na crosta de carne assada</i>	42
2.3.7.3	<i>Efeito da oxidação lipídica na reação de Maillard frente ao escurecimento não enzimático em carne assada</i>	44
2.3.7.4	<i>Formação de crosta em carne assada</i>	45
CAPÍTULO 3		47
3	EVOLUÇÃO DA COR E CROSTA DE LOMBO SUÍNO ASSADO EM CAVIDADE DE FORNO COM TEMPERATURA CONTROLADA	47
3.1	INTRODUÇÃO.....	47
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	49
3.2.1	Matéria-prima	49
3.2.2	Unidade experimental	51
3.2.3	Processo de assamento de lombo suíno	53
3.2.4	Perfis de temperatura	54
3.2.5	Variação de Massa	55
3.2.5.1	<i>Umidade Global</i>	56
3.2.5.2	<i>Umidade Local Média</i>	56
3.2.6	Cor	57
3.2.7	Espessura da crosta	58
3.2.8	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em crostas de lombo suíno	58
3.2.9	Análise de pigmento marrom da crosta	59
3.2.9.1	<i>Processo de extração</i>	59
3.2.9.2	<i>UV-Vis de pigmento marrom</i>	59
3.2.9.3	<i>FTIR de pigmento marrom</i>	59
3.2.10	Análise dos resultados	60
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
3.3.1	Classificação da matéria-prima	61
3.3.2	Validação da temperatura na cavidade do forno	62
3.3.3	Perfis de temperatura no lombo suíno durante o assamento	65
3.3.4	Variação de massa	67

3.3.5	Mudanças de Cor.....	69
3.3.6	Formação de crosta	74
3.3.7	FTIR de crosta de lombo suíno assado.....	76
3.3.8	Análise de extrato de pigmento marrom de lombo suíno assado.....	79
3.3.8.1	<i>Ensaio de UV-Vis de pigmento marrom.....</i>	79
3.3.8.2	<i>Ensaio de FTIR de pigmento marrom</i>	80
3.4	CONCLUSÃO.....	83
CAPÍTULO 4.....		84
4	ESTUDO DA DEFORMAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LOMBO SUÍNO DURANTE ASSAMENTO COM TEMPERATURA CONTROLADA	84
4.1	INTRODUÇÃO.....	84
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	86
4.2.1	Matéria-prima	86
4.2.2	Caracterização térmica de lombo suíno	86
4.2.2.1	<i>Capacidade de Retenção de Água (CRA).....</i>	86
4.2.2.2	<i>Módulo de Elasticidade (G').....</i>	86
4.2.2.3	<i>Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC).....</i>	87
4.2.3	Unidade experimental e assamento de lombo suíno.....	87
4.2.4	Perdas por cozimento	88
4.2.4.1	<i>Perda de massa</i>	88
4.2.4.2	<i>Perda de Sólidos Solúveis</i>	88
4.2.5	Textura	89
4.2.5.1	<i>Força de cisalhamento</i>	89
4.2.5.2	<i>Suculência instrumental</i>	89
4.2.6	Encolhimento das amostras durante o assamento.....	90
4.2.6.1	<i>Dimensões</i>	90
4.2.6.2	<i>Volume aparente.....</i>	91
4.2.7	Composição centesimal	92
4.2.7.1	<i>Valor energético</i>	92
4.2.8	Modelagem matemática de propriedades físicas de lombo suíno assado.....	92

4.2.9	Análise dos resultados	93
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES PRÉVIOS	93
4.3.1	Capacidade de Retenção de Água (CRA)	93
4.3.2	Módulo de Elasticidade (G')	94
4.3.3	Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	96
4.3.4	Perdas por cozimento	97
4.3.5	Textura	99
4.3.5.1	<i>Força de cisalhamento</i>	99
4.3.5.2	<i>Suculência</i>	102
4.3.6	Encolhimento de lombo suíno assado	104
4.3.6.1	<i>Dimensões</i>	104
4.3.6.2	<i>Encolhimento de volume</i>	106
4.3.7	Composição centesimal	108
4.3.8	Modelagem matemática das propriedades físicas de lombo suíno assado	113
4.3.9	Análise de correlação em propriedades físicas de lombo suíno assado	117
4.4	CONCLUSÃO	121
5	PERSPECTIVAS E DESAFIOS SOBRE ASSAMENTO DE LOMBO SUÍNO 122	
	CAPÍTULO 6	124
6	CONCLUSÃO FINAL	124
7	REFERÊNCIAS	126

DIAGRAMA CONCEITUAL

Modificação das propriedades físico-químicas de lombo suíno (*M. longissimus dorsi*) durante o assamento em forno com temperatura controlada

Por quê?

- Lombo suíno é um corte nobre comumente consumido após assamento e suas propriedades físico-químicas são afetadas pelas condições de assamento;
- Melhorias na qualidade de carne assada e dos sistemas de assamento podem ser obtidas pela compreensão do efeito das variáveis de processo na evolução do assamento;
- Equações representativas de evolução de propriedades físico-químicas de lombo suíno podem ser aplicadas em projetos de simulação do processo de assamento, trazendo desenvolvimento e aprimoramento de fornos, além de programações culinárias de carnes para uso doméstico, comercial e na indústria de pratos prontos.
- Correlações entre as propriedades físico-químicas da carne assada podem viabilizar medidas indiretas do assamento e da aceitação da carne assada pelos consumidores.

O que foi feito?

- Assamento de lombo suíno em cavidade com validação de temperatura controlada, avaliando a evolução da temperatura e umidade da carne com a evolução das propriedades físico-químicas e suas possíveis correlações. Como a velocidade de transferência de calor influencia a transferência de massa e com isso, os atributos de qualidade funcional como a desnaturação de proteína e mudança de cor do corte assado.

Hipóteses

- Cada temperatura de assamento altera de maneira diferente a evolução das propriedades físico-químicas do lombo suíno;
- A cor da superfície tem relação com a umidade e temperatura da crosta e pode ser descrita matematicamente;
- A evolução das propriedades físicas tem relação com a temperatura do centro e umidade global da carne assada e é possível descrever matematicamente as alterações nas propriedades físico-químicas de lombo suíno durante assamento em forno controlado;
- As propriedades físicas evoluem simultaneamente e podem ser correlacionadas entre si.

Metodologias

- Assamento controlado de amostras retangulares de lombo suíno a 180, 200 e 220 °C e determinação experimental da evolução de propriedades físico-químicas: perfis de temperatura do centro e superfície, variação da massa (umidade global e local), perdas por cozimento (perda de massa e perda de sólidos solúveis), força de cisalhamento, suculência, encolhimento, composição centesimal, valor energético, cor e espessura da crosta de lombo suíno assado;
- Modelagem das propriedades físico-químicas do lombo com a temperatura e umidade durante o assamento;
- Correlação entre as propriedades físico-químicas de lombo suíno assado.
- Estudo da desnaturação, deformação e propriedades mecânicas da proteína de lombo suíno em função da temperatura;
- Caracterização do escurecimento da crosta de lombo suíno assado e relação com a temperatura e umidade.

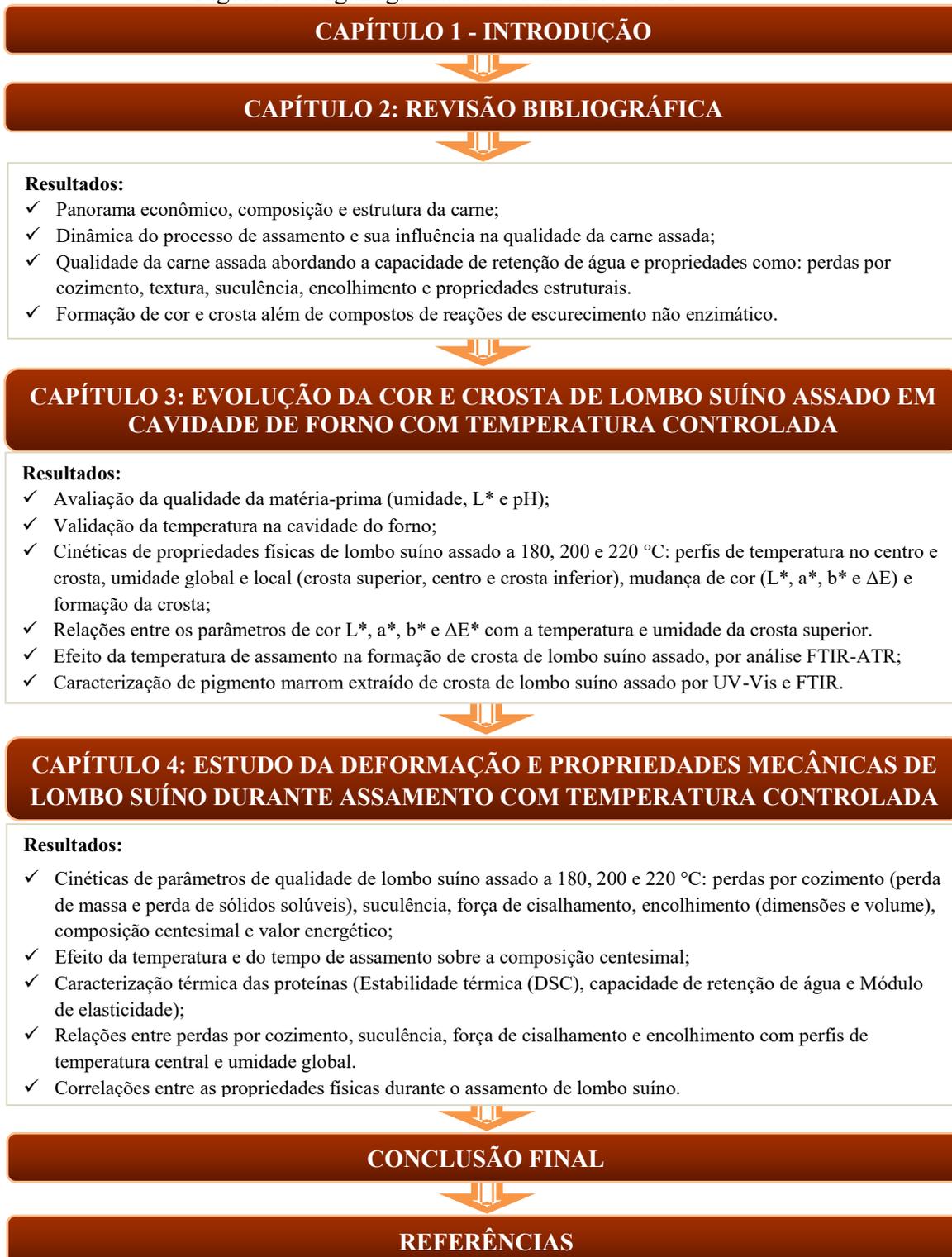
Resultados

- Determinação precisa e reprodutiva, além da descrição matemática por equações representativas da evolução de propriedades físico-químicas de lombo suíno assado em condições minuciosamente controladas;
- Compreensão da desnaturação térmica de proteína sobre a evolução simultânea das propriedades físico-químicas de lombo suíno assado;
- Características e equacionamento do escurecimento na crosta de lombo suíno assado.

ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A Figura 1 apresenta a divisão e organização da tese.

Figura 1 - Organograma do documento de tese.



CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A produção e consumo de carne suína têm mostrado grande crescimento em todo o mundo (FAO; OCDE, 2019; ABPA, 2020). Com isso, o controle eficiente de processos de cozimento, como o assamento, são importantes para a indústria e para os consumidores, por afetar diretamente a segurança e a qualidade da carne cozida (BOTTANI; VOLPI, 2009). O assamento de carne em forno elétrico é uma maneira comum de cocção de peças inteiras de carne suína em residências, em cozinhas profissionais e no setor de *food service*. Além disso, há interesse industrial ligado ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de fornos elétricos destinados ao preparo de carnes (BOWERS et al., 2012).

O assamento de carne é uma prática antiga que evoluiu para técnicas de cozimento sofisticadas, com possibilidade de controlar com precisão as variáveis de processo. O resultado culinário ideal pode ser alcançado não mais de forma empírica, mas por meio de programação das variáveis do processo de cozimento (assamento). Contudo, determinar o efeito das transferências de calor e massa durante o processo de cozimento sobre as propriedades físico-químicas de carne assada ainda é motivação de muitos estudos (CHIAVARO et al., 2009; MORA et al., 2011; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). Pode-se afirmar que a qualidade final da carne assada é afetada diretamente pela velocidade com que as transferências de calor e massa acontecem dentro do forno (CHIAVARO et al., 2009). Elas dependem da temperatura e tempo de cocção, velocidade do ar quente e da umidade relativa do ar, além das propriedades físicas da própria carne (BOTTANI; VOLPI, 2009; RINALDI; CHIAVARO; MASSINI, 2010; SZMAŃKO et al., 2021). Há uma demanda por estudos que encontrem condições de cozimento que favoreçam a qualidade sensorial e nutricional de cada corte suíno, atuando sobre as variáveis de processo e quantificando seus efeitos sobre a qualidade da carne assada (CHANNON; D'SOUZA; DUNSHEA, 2016).

O processo de cozimento em forno causa constantes mudanças na estrutura heterogênea da carne. Estas alterações são induzidas pelos processos físico-químicos complexos que ocorrem simultaneamente, como evaporação da água, perdas por gotejamento, desnaturação de proteínas, mudanças dimensionais, formação de crosta, formação de porosidade, cor e formação de compostos indicadores da reação de Maillard (TORNBERG, 2005; FEYISSA, 2011; SUMAN et al., 2016; WANG et al., 2019). Dessa forma, as alterações ocorrem especialmente na capacidade de retenção de água, perdas por cozimento, maciez, cor,

sabor, aroma e valor nutricional, ambas importantes na avaliação da qualidade visual e sensorial da carne cozida (CHRISTENSEN et al., 2011; HUGHES et al., 2014; SUMAN et al., 2014, 2016; FELLOWS, 2016).

O lombo é um corte tradicional e ocupa um espaço nobre no consumo de carnes suínas. O lombo é caracterizado como um corte magro obtido da região lombar dos suínos (*M. longissimus dorsi*, constituído de duas porções *longissimus thoracis* e *longissimus lumborum*) (ABCS, 2010; BERTOL, 2019). O processamento de lombo suíno, em especial a cocção em forno, merece estudos que melhorem sua qualidade na forma assada. A compreensão das mudanças simultâneas de suas propriedades físico-químicas na complexa estrutura da carne é importante para a área de ciência da carne, além da maior valorização do corte e do método de cocção. A qualidade da carne assada está relacionada com propriedades físico-químicas como temperatura do centro e superfície, variação da massa (umidade global e local), perdas por cozimento (perda de massa e perda de sólidos solúveis), força de cisalhamento, suculência, encolhimento, composição centesimal, valor energético, cor e espessura da crosta de lombo suíno assado. Além disso, a evolução da cor superficial da carne, principalmente a etapa de escurecimento da crosta não tem a sua relevância descrita na literatura.

O processo de assamento de lombo suíno é tratado de forma limitada na literatura, sem a validação da temperatura da cavidade, além da investigação superficial quanto às propriedades físico-químicas da carne assada. Dessa forma, é necessário um estudo do processo de assamento de lombo suíno em forno com temperatura controlada, para melhor compreender a influência das variáveis do processo de cocção sobre as alterações nas propriedades físico-químicas do lombo. Por fim, representar tais alterações por meio de modelos com viabilidade de aplicação em simulações visando o aperfeiçoamento e desenvolvimento de cavidades de fornos baseados na qualidade da carne assada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar experimentalmente a evolução temporal das propriedades físico-químicas de lombo suíno durante o assamento em cavidade com temperatura controlada e propor modelos matemáticos para a evolução destas propriedades em função da temperatura e umidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar experimentalmente a evolução das propriedades físico-químicas do lombo suíno assado nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C: perfis temporais de temperatura no centro e superfície, variação da umidade global e local (crosta superior, centro e crosta inferior); perdas por cozimento (perda de massa e perda de sólidos solúveis), força de cisalhamento, suculência, encolhimento (dimensões e volume), composição centesimal, formação de crosta e mudança de cor (L^* , a^* , b^* e ΔE);
- Modelar a mudança de cor superficial de lombo suíno durante o assamento englobando os parâmetros do espaço de cor CIE L^* , a^* e b^* com a temperatura da crosta.
- Avaliar a formação de crosta e identificar a aglomeração de proteínas e formação de compostos de escurecimento característicos da reação de Maillard e oxidação lipídica.
- Caracterizar pigmento marrom extraído de crosta de lombo suíno assado em diferentes condições.
- Caracterizar a desnaturação térmica de proteína pela calorimetria de varredura diferencial, capacidade de retenção de água e módulo de elasticidade em função da temperatura.
- Modelar a capacidade de retenção de água e módulo de elasticidade em função da temperatura.
- Modelar a evolução das perdas por cozimento, suculência, força de cisalhamento, encolhimento e valor energético durante o assamento com a temperatura do centro e umidade.
- Obter correlações entre as propriedades físicas da carne durante o assamento.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segue revisão bibliográfica abordando informações relevantes de carne suína, processo de assamento e sua influência sobre as principais modificações físico-químicas na carne.

2.1 CARNE

2.1.1 Carne suína no panorama econômico

A suinocultura brasileira ocupa uma posição de destaque no cenário mundial. A carne suína brasileira é reconhecida pela qualidade nos exigentes mercados internacionais sendo competitiva perante seus concorrentes. O Brasil é o quarto maior produtor de carne suína do mundo com 4,436 milhões de toneladas de carne de suína produzidas em 2020, sendo 23,0 % destinado à exportação e 77,0 % para mercado interno. No quesito exportação ocupou o quarto lugar, exportando 1024 milhões de toneladas, sendo 87,49 % em forma de cortes de suíno, 9,13 % exportado como miúdos e apenas 3,38 % é exportado como outros produtos. Santa Catarina foi responsável por 51,68 % da exportação de carne suína em 2020. A região sul do país foi responsável por 70,91 % do abate de suínos no Brasil, sendo que Santa Catarina foi responsável por 30,73 % dessa produção (ABPA, 2021). Assim, a carne suína tem grande importância na economia nacional e impacta na cadeia produtiva mundial.

O relatório Perspectivas Agrícolas 2019-2028 conjunto da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) sugere que as exportações brasileiras de carne suína devem aumentar 30-40 % até 2028, sendo uma projeção a partir da média registrada entre 2016 e 2018. Para o mesmo intervalo, uma média de 602 milhões de toneladas também foi registrada e adotada como base para prever 785 milhões de toneladas dentro de oito anos, expansão média superior a 1% ao ano. Além disso, a média de produção de carne suína entre 2016 e 2018 foi de 3822 milhões de toneladas, sendo prevista uma produção de 4510 milhões de toneladas em 2028.

A carne suína integra mais de 40 % do consumo total de carne per capita do mundo,

tornando-a a carne mais consumida em nível mundial. A carne suína representa a terceira carne mais consumida no Brasil, perdendo para as carnes de frango e bovina, respectivamente (BERTOL, 2019). Com relação ao consumo per capita de carne suína, o Brasil atingiu 16,0 kg/habitante no ano de 2020 (ABPA, 2021). Assim, a carne suína tem grande importância na economia nacional.

2.1.2 Composição e estrutura da carne

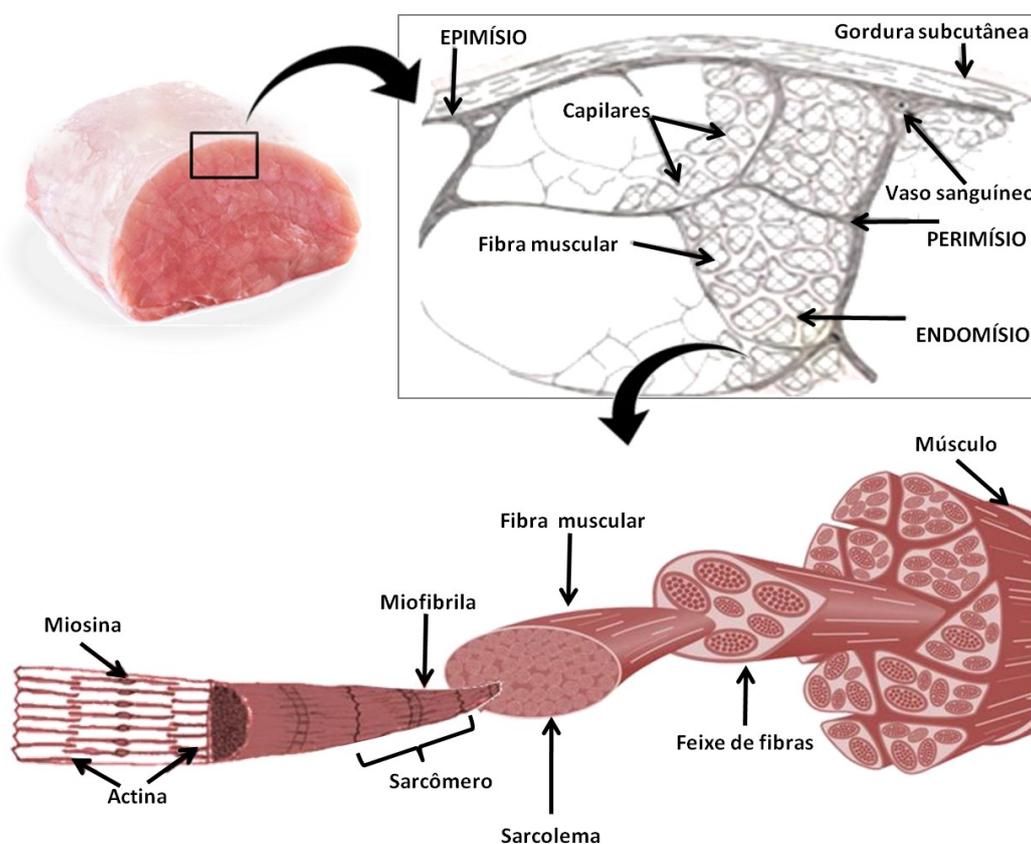
A carne é uma matéria-prima altamente heterogênea que contém grandes quantidades de água. Os valores médios da composição de macronutrientes do lombo suíno fresco são de 73,2 % de umidade, 23,5 % de proteína, 2,5 % de gordura, 1,15 % de minerais, e seu conteúdo energético equivalente a $176 \text{ kcal} \cdot 100\text{g}^{-1}$ com $55 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de colesterol (BECKER et al., 2016). A cocção de lombo suíno altera a concentração de nutrientes pela redução de água na estrutura da carne. Assim, além dos dados de composição do corte cru, deve-se levar em consideração os dados do corte cozido (BERTOL, 2019; LIMA et al., 2011).

A água presente na carne está associada principalmente às proteínas miofibrilares que participam no mecanismo de retenção de água. Cerca de 10 % são mantidas no sarcoplasma, entre as miofibrilas (interfibrilar), e uma parte substancial (80 %) mantida pelas miofibrilas, entre os miofilamentos (intrafilamental) e outros 10 % no espaço extracelular, em espaços macrocapilares (entre fibras e feixes de fibras) (TORNBORG, 2005; LAWRIE; LEDWARD, 2006)

As proteínas musculares são constituídas principalmente por proteínas miofibrilares, seguidas das sarcoplasmáticas e das estromais. As proteínas miofibrilares são representadas principalmente pela actina e miosina, responsáveis pela retenção de água no tecido muscular e constituem a unidade da contração muscular, o sarcômero. As proteínas sarcoplasmáticas são compostas por proteínas do metabolismo celular e pigmentos, como mioglobina e hemoglobina, sendo responsáveis pela coloração da carne. As proteínas do estroma são constituídas principalmente por colágeno, reticulina e elastina, formando o tecido conjuntivo, que sofre gelificação sob a ação do calor (LAWRIE; LEDWARD, 2006). Os carboidratos estão presentes na carne em quantidades desprezíveis, na forma de glicogênio e glicose, tendo pouco efeito no valor nutricional. A carne vermelha é uma excelente fonte de ferro, onde 60 a 70% se encontra complexado com o grupo orgânico heme. O ferro heme é proveniente da hemoglobina e mioglobina, sendo altamente biodisponível; cerca de 48% do ferro na carne suína é ferro heme (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013).

A estrutura da carne pode ser considerada como um conjunto de fibras musculares paralelas, formando uma estrutura miofibrilar, unida por uma rede contínua de tecido conjuntivo (BOUTON; HARRIS; SHORTHOSE, 1975), como ilustrado na Figura 2. O tecido conjuntivo intramuscular fornece uma integração perfeita das fibras musculares individuais em um órgão como um todo, sendo dividido em três níveis de estruturas. A camada mais externa do tecido conjuntivo é o epimísio, que envolve cada músculo, sendo contínua com os tendões. O epimísio está conectado a uma estrutura intramuscular do tecido conjuntivo, o perimísio, que envolve feixes de fibras musculares e constitui a maior parte do colágeno intramuscular. O perimísio, por sua vez, conecta-se ao endomísio, que é outra camada intramuscular de tecido conjuntivo que circunda cada fibra muscular (PURSLOW, 2014). A gordura presente na carne magra é distribuída de maneira uniforme na estrutura muscular, sendo essencialmente a gordura intramuscular, que proporciona a marmorização da carne (depositada junto ao perimísio) e pequenas quantidades da intermuscular (depositada junto ao epimísio) (LAWRIE; LEDWARD, 2006; GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013).

Figura 2 - Diagrama estrutural muscular e composição interna da fibra muscular.



Fonte: Adaptado de Gomide et al. (2013).

2.1.3 Qualidade da carne *in natura*

A qualidade da carne *in natura* depende diretamente da capacidade de retenção de água que é constantemente afetada pela origem, condições de obtenção e conservação da carne. A qualidade do lombo suíno *in natura* é frequentemente ameaçada pelas condições PSE (sigla inglesa *pale, soft e exudative*) e DFD (sigla inglesa *dark, firm and dry*), que refletem em baixa e alta capacidade de retenção de água (CRA), respectivamente. O uso de carnes PSE e DFD pode mascarar o efeito das variáveis do processo de cozimento no forno diante de alterações nas propriedades físicas e químicas do lombo suíno. Durante o cozimento das carnes PSD, há uma perda significativa de exsudato por gotejamento e perda de cozimento. Consequentemente, a carne cozida tem menos suculência e maciez e um coeficiente de encolhimento mais significativo. Em contraste, ao cozinhar carnes DFD, há falta de açúcares para que ocorra a reação de Maillard, menor probabilidade de reações de oxidação de gordura, e, perda de exsudato e perda de cozimento reduzidas (LAWRIE; LEDWARD, 2006; GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013). O uso de carnes com anomalias pode mascarar o efeito das variáveis de processo de cozimento sobre as propriedades físico-químicas do lombo suíno cozido. Além disso, a estrutura celular do lombo suíno *in natura* pode ser modificada pelo congelamento e armazenamento. Nesse caso, as condições de conservação aplicadas têm grande impacto na qualidade da carne (CHOI et al., 2017). Dessa forma, muitos fatores afetam a qualidade da carne *in natura* e ao avaliar as alterações de propriedades físico-químicas de lombo suíno durante o assamento é necessário considerar a qualidade de matéria-prima com muita atenção.

2.2 PROCESSO DE ASSAMENTO EM FORNO

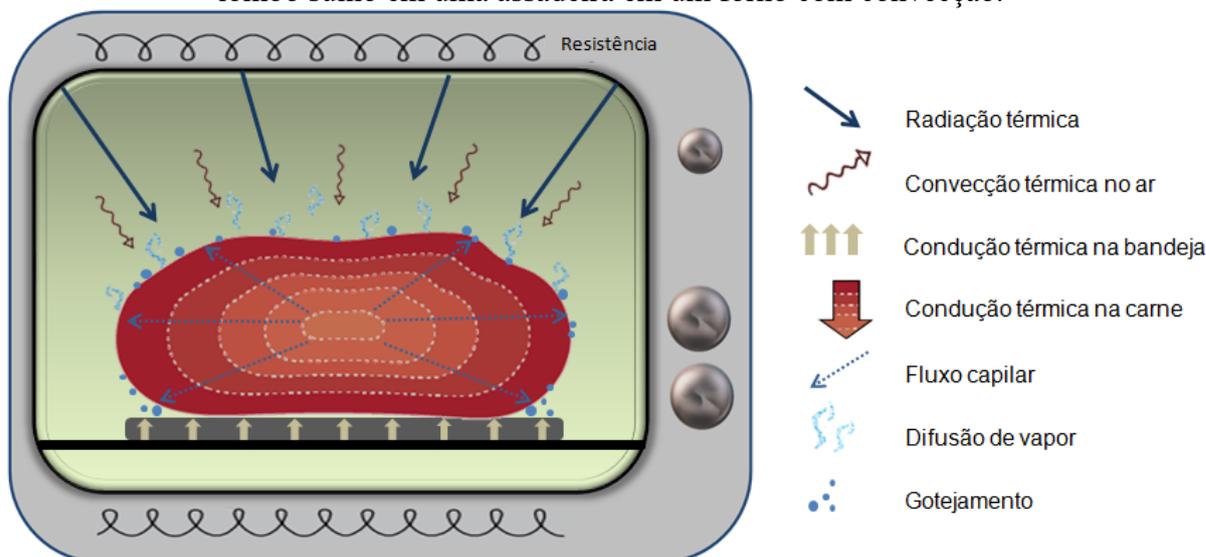
Os métodos convencionais de cozimento de carne transferem calor por meio da condução, convecção e radiação. As técnicas de cozimentos se diferem entre si pela temperatura na superfície da carne, o perfil de temperatura no domínio da carne e o método de transferência de calor. O cozimento da carne geralmente envolve mais de um tipo de transferência de calor. Os métodos de calor seco envolvem técnicas como assar, grelhar e fritar. Neste trabalho será estudado o assamento de lombo suíno, um método de calor seco aplicado a um músculo com baixo teor de tecido conjuntivo.

2.2.1 Dinâmica do processo de assamento em forno

A cocção de carnes em fornos ocorre pela radiação emitida pelas paredes e pelo ar aquecido, que modifica as características sensoriais e a biodisponibilidade da carne, além de conservá-la por mais tempo pela destruição de microrganismos e pela redução da atividade de água da sua superfície (FELLOWS, 2016). Dentro de um forno convectivo, as transferências de energia e massa dependem de inúmeros fatores, como o tempo de cozimento, a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do fluxo de ar e as dimensões da amostra. Deve-se também considerar as características da própria carne como a difusividade térmica e difusividade da água no tecido muscular (BOTTANI; VOLPI, 2009; RINALDI; CHIAVARO; MASSINI, 2010; BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014).

A Figura 3 ilustra os fenômenos de transporte de calor e massa que ocorrem durante o assamento de lombo suíno em uma assadeira em um forno convectivo. A carne é exposta a um fluxo de ar quente, que causa a transferência de calor por convecção do ar para a superfície da carne. O elemento de aquecimento da base do forno transfere calor por convecção e condução, aquecendo a cavidade do forno onde ocorre o assamento. O aquecedor no topo do forno é empregado para dourar o alimento. Nesse caso, o calor é transferido de forma dominante por radiação do aquecedor e das paredes do forno para a carne (MISTRY et al., 2006). O calor transferido por convecção do ar quente e por radiação das superfícies quentes do forno aquece a superfície da peça de carne submetida ao cozimento. Esse aquecimento cria um gradiente de temperatura na peça, que resulta em uma transferência de calor por condução da superfície do alimento para o seu interior (FELLOWS, 2016). A temperatura da superfície é sempre mais alta que a do centro, mas essa diferença tende a diminuir durante o cozimento. É importante observar que a alteração das condições de cozimento promove modificação do coeficiente de transferência de calor da cavidade do forno para a peça em processo de cozimento (RANKEN, 2000).

Figura 3 - Fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante o cozimento de lombo suíno em uma assadeira em um forno com convecção.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A transferência de massa do interior para a superfície é um fenômeno importante que ocorre durante o assamento de carne. Uma diminuição significativa da massa da carne é observada durante o processo, o que é atribuída à perda de água e sólidos solúveis. A transferência de umidade do interior da carne para a zona de evaporação ocorre principalmente por fluxo capilar, mas a difusão de líquido superficial e difusão de vapor até a crosta formada na superfície da carne também contribuem para esta transferência. À medida que ocorre a evaporação, ocorre também o transporte interno de umidade em direção à superfície da carne. Quando a taxa de perda de umidade na superfície é maior que a taxa de transferência de água do interior para a superfície, a zona de evaporação modifica-se e a superfície seca. Isso leva à formação de uma crosta e sua temperatura aumenta e tende a atingir a temperatura do ar quente (GOÑI; SALVADORI, 2010; FELLOWS, 2016).

A literatura reporta que a carne assada pode perder uma importante quantidade de sua massa por evaporação e por gotejamento, dependendo da temperatura e do tempo de assamento (GOÑI; SALVADORI, 2010). A maior parte da evaporação é garantida pela água que flui do centro para a superfície da carne, mantendo a pressão de vapor elevada nessa região (KONDJOYAN et al., 2013). A desnaturação e contração das proteínas causa fluxo de líquido para a superfície e gotejamento. As perdas por gotejamento fluem diretamente pelos capilares formados na estrutura da carne assada e geralmente é negligenciada matematicamente pela complexa determinação experimental. A água líquida expelida da carne por gotejamento permanece acumulada à superfície até a formação de grandes gotas. A partir disso, a água flui

para regiões inferiores da carne e fundo do recipiente. Este trajeto certamente depende da força gravitacional e da tensão superficial que a gota deve sofrer, bem como da viscosidade do fluido gotejado. Simultaneamente, a fração de água gotejada sofre evaporação durante o assamento, subestimando a contribuição das perdas por gotejamento (BENGTSSON; JAKOBSSON; SIK, 1976; GOÑI; SALVADORI, 2010).

A quantidade de umidade perdida é determinada pela natureza do alimento, pelo movimento do ar no forno e pela taxa de transferência de calor (FELLOWS, 2016). A matriz de carne sofre alterações estruturais e físicas durante o processamento térmico que também podem afetar as taxas de transferência de calor (CEPEDA et al., 2013), como o encolhimento e a formação de poros (FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009). As transformações que ocorrem nas partes internas da carne são interdependentes e, dependem das transformações que ocorrem na superfície. Além disso, a interação de todas as transformações tornam complexas as camadas limites na superfície da carne (CEPEDA et al., 2013).

A transferência de calor e massa é controlada em parte pelas camadas limites hidrodinâmica, térmica e de concentração que se formam na fase gasosa junto à superfície irregular da carne em processo de assamento. Uma maior velocidade do ar implica em uma menor espessura de camada limite, o que aumenta os coeficientes de transferência de calor e de massa, aumentando a taxa de evaporação na superfície (FELLOWS, 2016), além de homogeneizar o cozimento da carne assada no forno (BOWERS et al., 2012). Fornos que combinam o controle preciso da convecção com as vantagens do cozimento a vapor oferecem várias opções de cozimento em um único equipamento (VITTADINI et al., 2005). As transferências de calor e massa são modificadas, com aumento da taxa de transferência de calor e modificação do processo de evaporação superficial da água (CHIAVARO et al., 2009; PATHARE; ROSKILLY, 2016). A circulação de ar melhora a transferência de calor por convecção que aumenta a evaporação na superfície da carne, enquanto altas umidades relativas produzidas com a injeção de vapor reduzem a evaporação superficial (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014).

2.2.2 Influência do assamento na qualidade da carne

O cozimento tem como objetivo principal a modificação das características sensoriais da carne crua, por meio de alterações bioquímicas e físicas causadas pelo aquecimento, que determinam a aceitabilidade da carne cozida pelos consumidores. Paralelamente, o cozimento é uma etapa crítica para a destruição dos microrganismos patogênicos presentes na superfície

da carne, garantindo a segurança microbiológica da carne. Por outro lado, o assamento também inativa os microrganismos deteriorantes, aumentando a vida útil da carne assada.

O controle da temperatura final no centro geométrico da carne garante o grau de cozimento ideal. O tempo de assamento é altamente dependente das condições do processo e tamanho da amostra (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014). A temperatura central final atualmente recomendada para carne suína varia entre 70 e 75 °C (CHIAVARO et al., 2009; AMSA, 2015; CHANNON; D'SOUZA; DUNSHEA, 2016; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). Nesta faixa de temperatura é obtido um grau de cozimento ideal, com aceitação sensorial pelos consumidores (CHANNON; D'SOUZA; DUNSHEA, 2016; WANG et al., 2019).

As condições do processo de assamento influenciam as alterações nas propriedades físico-químicas do lombo suíno (VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; SZMAŃKO et al., 2021). Deste modo, compreender e controlar os atributos de qualidade do lombo suíno durante o cozimento tem sido objeto de muitos estudos (VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). O controle da temperatura e do tempo de cozimento é reconhecido como crucial no processo de assamento de carnes. O tempo de cozimento é variável, pois depende das condições de operação do equipamento e do tamanho e da forma do corte da carne (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014). Altas temperaturas tendem a reduzir o tempo de cozimento (VITTADINI et al., 2005) e os fornos comerciais usam temperaturas superiores a 150 °C (CHIAVARO et al., 2009; FEYISSA et al., 2011; FEYISSA; GERNAEY; ADLER-NISSEN, 2013).

A Tabela 1 apresenta os estudos reportados da literatura sobre a influência do assamento em lombo suíno e a obtenção de suas propriedades físico-químicas. As propriedades avaliadas durante o assamento envolvem perfis de temperatura, capacidade de retenção de água, perdas por cozimento, perda de sólidos solúveis, força de cisalhamento, encolhimento, cor e outros. Há estudos que avaliam o efeito do método e da temperatura de assamento nas propriedades do lombo suíno assado (VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). Contudo, nenhum estudo reportou a realização de controle de temperatura no interior da cavidade, além de caracterização detalhada da matéria-prima utilizada. Outros estudos usam condições fixas de assamento e temperatura, não esclarecendo os efeitos que as variáveis de cozimento têm sobre propriedades físico-químicas específicas (FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009; FEYISSA; GERNAEY; ADLER-NISSEN, 2013; PÖLDVERE et al., 2016). Dessa maneira, o efeito das variáveis de

processo se torna limitada e inconclusiva, pois há carência de estudos minuciosos avaliando as propriedades físico-químicas em lombo suíno assado em condições estritamente controladas.

Existe a necessidade de determinar experimentalmente propriedades físico-químicas como temperatura do centro e superfície, variação da massa (umidade global e local), perdas por cozimento (perda de massa e perda de sólidos solúveis), força de cisalhamento, suculência, encolhimento, composição centesimal, valor energético, cor e espessura da crosta de lombo suíno assado. Além disso, a melhor compreensão da etapa de escurecimento da crosta de lombo suíno é relevante pois não se tem informações documentadas na literatura.

Uma cavidade de forno adaptado como um sistema modelo com isolamento térmico e controle pontual de temperatura é capaz de controlar e transferir calor de forma homogênea ao alimento. Com a transferência de calor controlada, a transferência de massa também pode ser determinada minuciosamente com o auxílio de célula de carga (sensível a pequenas variações de massa) acoplada ao forno (SILVA et al., 2022). Este sistema modelo associado à padronização de amostras de lombo suíno deve proporcionar bom desempenho e reprodutibilidade na obtenção de dados experimentais de propriedades físicas durante o processo de assamento. Com os dados experimentais representativos é possível relacionar e modelar matematicamente a evolução simultânea das transformações físicas do lombo suíno assado. Estes modelos ajudam a entender o efeito da desnaturação enquanto assamento e a relevância da evolução de cada propriedade física que resultará na qualidade final do lombo suíno assado. Além disso, modelos representativos da evolução das propriedades físico-químicas podem ser utilizados em simulações do processo de assamento, visando a previsão dos parâmetros de qualidade, otimizando e melhorando as configurações do processo de assamento.

Tabela 1 - Literatura sobre avaliação de propriedades físico-químicas de lombo suíno (*M. longissimus dorsi*) assado

Processo de assamento de lombo suíno	Propriedades avaliadas	Resultados relevantes	Referência
(3 × 3 × 7) cm ³ na direção das fibras musculares: Forno NC, FC e FC/S a 180 °C até Ti=75 °C	Perfil de temperatura; Perdas por cozimento; Força de cisalhamento; Cor na superfície e no centro.	Efeito dos métodos de assamento nas propriedades físicas avaliadas. FC/S foi mais rápido a atingir 75 °C no centro, mas ocasionou maiores perdas por cozimento e cor mais pálida na superfície. A cor interna foi menos influenciada pelo tratamento de assamento.	VITTADINI et al. (2005)
(3 × 3 × 6) cm ³ ao longo das fibras musculares: Forno FC e FC/S a 100, 110, 120 e 140 °C até Ti=75 °C	Perfil de temperatura; Perdas por cozimento; Capacidade de retenção de água; Força de cisalhamento; Cor na superfície e no centro.	Efeito da temperatura e umidade relativa nas propriedades físicas avaliadas. O aumento da temperatura e do vapor aceleram o assamento, provocaram maiores perdas por cozimento e menor capacidade de retenção de água. A cor foi favorecida em maiores temperaturas e menores umidades relativas. A força de cisalhamento determinada em texturômetro aumentou.	CHIAVARO et al. (2009)
(40 × 40 × 54) mm ³ obtidas ao longo da direção das fibras: Forno a 175 °C, com ventilação e sem umidificação por 35 min	Umidade local em diferentes posições; Encolhimento de dimensões e Perda de sólidos solúveis.	As perdas de sólidos solúveis no assamento foram mínimas. O mecanismo de transferência de água proposto afirma que não ocorre acúmulo de água no centro da amostra. Diferentes comportamentos de encolhimento foram identificados. O encolhimento pode ser influenciado pela variação biológica no mesmo músculo e favorece o transporte de água para fora da estrutura. Maiores perdas por cozimento são obtidas quando a amostra encolhe em todas as direções em comparação com a amostra que expande em uma direção.	FEYISSA et al. (2009)

(40× 40 × 54) mm ³ obtidas ao longo da direção das fibras: Forno a 175 °C, com ventilação e sem umidificação por 35 min	Perfil de temperatura; Conteúdo de água local; Previsão 3D de temperatura e teor de umidade.	Modelo matemático 3D de transferência de massa e calor no assamento de lombo suíno assado. O modelo foi desenvolvido com avaliações teóricas e experimentais incluindo o efeito da mudança na microestrutura (permeabilidade, capacidade de retenção de água e módulo de elasticidade).	FEYISSA et al. (2013)
<i>longissimus thoracis</i> ao longo das fibras musculares: NC / PP a 120 °C (Ti= 62, 67, 72, 77 e 82 °C)	Tempo de cozimento; Umidade; Perdas por cozimento; Capacidade de retenção de água; Força de cisalhamento e Condutividade elétrica	A condutividade elétrica diminui significativamente com o aumento da temperatura interna da amostra. As perdas por cozimento desfavorecem a condutividade elétrica com correlação negativa de -0,941.	PÕLDVERE et al. (2016)
(3 x 3 x 1) cm ³ ao longo das fibras musculares: Forno FC e FC/S a 120, 140, 160 e 180 °C por 20 min	Perfil de temperatura; Força de cisalhamento; microestruturas, cor, compostos voláteis e análise sensorial.	A força de cisalhamento determinada em texturômetro aumentou com o tempo e a temperatura. As amostras cozidas no forno FC/S apresentaram maior elasticidade e mastigabilidade, indicando melhor qualidade sensorial. O vapor preservou a estrutura da carne assada. A quantidade de compostos voláteis aumentou com o tempo de cozimento e 95 compostos voláteis foram identificados ao assar em FC/S. O parâmetro L* aumentou durante o período inicial e depois diminuiu, ao passo que a* e b* mostraram um aumento contínuo.	WANG et al. (2019)

60g (50 x 40 x 30) mm³
 obtidas ao longo das fibras
 musculares (amostras P) e
 obtidas transversalmente à
 direção das fibras
 musculares (amostras D):
 Forno a 125 e 150 °C, sem
 ventilação e umidificação
 por ~80 min (Ti = 72 °C)

Tempo de cozimento; Perdas por cozimento;
 Capacidade de retenção de água; Força de
 cisalhamento; Encolhimento de volume
 aparente; Encurtamento de fibra; Diâmetro e
 comprimento da fibra; Número de fibras por
 área de seção transversal

Maior CRA, menor perda por cozimento, menor redução de comprimento e menor encolhimento foram encontrados em amostras P em comparação com amostras D. A perda por cozimento e a redução do comprimento aumentaram com o aumento da temperatura em ambas as amostras. O aumento da temperatura e direção das fibras na diagonal favoreceu a contração do perimísio, reduzindo espaços livres ao redor das fibras musculares, resultando em maiores perdas por cozimento.

SZMAŃKO et al.
 (2021)

NC – Convecção natural; FC – Convecção forçada; FC / S - Convecção forçada combinado com vapor; NC / PP – Convecção natural em embalagem plástica; Ti – Temperatura interna central.

2.3 QUALIDADE DA CARNE ASSADA

O conceito de carne cozida de alta qualidade do ponto de vista físico é complexo, pois é uma combinação otimizada de vários atributos que dimensionam a melhor condição do alimento cozido. A condição ideal da carne assada deve abranger segurança microbiológica, aceitação sensorial e valor nutricional. O controle da qualidade do lombo suíno assado precisa considerar as alterações de capacidade de retenção de água, desnaturação proteica, perdas por cozimento, força de cisalhamento, suculência, encolhimento, propriedades estruturais e cor. Além disso, a formação de crosta e de compostos da reação de Maillard é importante para a aceitação sensorial da carne assada. Para melhor compreender os fenômenos envolvidos na alteração dos atributos de qualidade de lombo suíno assado, os próximos tópicos abordam as teorias envolvidas nas mudanças das propriedades físico-químicas da carne.

2.3.1 Capacidade de retenção de água de carne assada

A CRA da carne cozida é a capacidade de reter a água presente na sua estrutura mediante a elevação de temperatura no processo de cocção (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013; RANKEN, 2000). O aquecimento durante o cozimento induz a mudanças nos componentes e na estrutura da carne, que causam diminuição na CRA, favorecendo a perda de água. A CRA tem importância fundamental para a qualidade da carne cozida, tendo apelo econômico e tecnológico, por interferir diretamente no rendimento e nos parâmetros de qualidade da carne cozida (CHENG; SUN, 2008; GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013; HUGHES et al., 2014; PURSLOW, 2014b).

O controle de qualidade de lombo suíno assado requer compreender os fatores que afetam a CRA. O processo selecionado deve favorecer a permanência da água na estrutura da carne durante o cozimento, combinando a técnica de assamento, a taxa de aquecimento, a temperatura de cozimento e a temperatura do ponto final. Altas temperaturas podem reduzir o tempo de cozimento, mas também podem favorecer menores CRA na carne, afetando diretamente as perdas por cozimento, a textura e a cor da carne (BEJERHOLM; AASLYNG, 2004; CHENG; SUN, 2008; CHIAVARO et al., 2009).

2.3.2 Perdas por cozimento

A perda de massa resultante do cozimento é expressa como uma porcentagem da massa da peça de carne antes do cozimento. A perda de massa determina o rendimento tecnológico da operação de cozimento e é inversamente proporcional a CRA (WARNER, 2014). As mudanças na estrutura e formação de poros levam a um grande aumento da permeabilidade da água nessa estrutura, favorecendo o fluxo de líquido para as partes mais externas da carne (mais próximas da superfície). Um aumento local no teor de água pode ocorrer em qualquer posição da amostra, dependendo da grandeza dos gradientes de pressão e da permeabilidade local. Isso ocorre porque gradientes de pressão produzidos pela formação de vapor de água no interior do tecido muscular e pelo encolhimento da estrutura podem produzir fluxos de água em qualquer direção da amostra (FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009).

O método de corte de lombo suíno tem impacto significativo nas perdas por cozimento durante o assamento. A perda por cozimento diminui com o aumento do comprimento da peça na direção das fibras. Amostras obtidas ao longo das fibras musculares (paralelo) atingiram a temperatura de cozimento em tempo menor quando comparado com as amostras obtidas perpendicularmente (diagonal) (SZMAŃKO et al., 2021). Dessa forma, amostras com fibras diagonais apresentaram maior perda por cozimento quando comparadas às amostras com maior comprimento na direção das fibras. Entre os fatores que inibiram a liberação do suco muscular nas amostras, os autores citam os tubos endomisiais, que são visualmente reduzidos na seção transversal do músculo das amostras, o que pode ter ocasionado à retenção parcial de suco celular. Outro fator a ser considerado são as variações de desnaturação de proteínas e nas alterações do colágeno (LOCKER; DAINES, 1974). Uma desnaturação térmica mais lenta e mudanças mais intensas no colágeno resultam em maiores perdas por cozimento (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014; SZMAŃKO et al., 2021). O fato de que a perda é independente da geometria lateral das amostras sugere fortemente que a única perda significativa é das extremidades do corte (LOCKER; DAINES, 1974; SZMAŃKO et al., 2021).

2.3.3 Força de cisalhamento

A ação do calor durante o cozimento tem efeito dominante sobre os componentes do tecido muscular, influenciando diretamente a textura da carne (PURSLOW, 2017). A textura de carne cozida está relacionada à desnaturação das proteínas, encolhimento das fibras e solubilidade do colágeno (TORNBERG, 2005; PURSLOW et al., 2016). O calor solubiliza o colágeno que tem efeito de amaciamento, embora o calor desnature as proteínas miofibrilares que promovem o endurecimento (TORNBERG, 2005). Além disso, o processo de cozimento

altera a CRA da carne. Perdas na CRA tornam a carne menos macia por haver redução da água intracelular, com consequente aumento da resistência das fibras (PURSLOW, 2017).

As proteínas musculares desnaturam a diferentes temperaturas durante o aquecimento, alterando gradativamente a textura da carne cozida. A resistência da carne aumenta em duas fases distintas durante o cozimento. A primeira fase do endurecimento ocorre entre 40-50 °C ocasionado por mudanças no tecido conjuntivo. Estas mudanças são atribuídas à desnaturação da miosina (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014) e ao aumento da força do perimísio (CHRISTENSEN et al., 2011), possivelmente devido a um aumento na concentração de fibras de colágeno em uma determinada seção transversal, pois a desnaturação altera a estrutura terciária das proteínas (PURSLOW, 2014b). O período de amaciamento entre 50-60 °C é associado ao início da solubilização do colágeno. Na segunda fase do endurecimento, entre 60-80°C, ocorre o aumento da resistência promovido pela desnaturação dos componentes miofibrilares, actina e proteína estrutural titina (TORBERG, 2005; BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014).

Em relação ao amaciamento, a solubilização do colágeno termicamente lábil rompe ligações cruzadas e resulta no amaciamento da carne em curtos períodos de tempo (PURSLOW, 2014b). O colágeno solubilizado pode aumentar a retenção de água na estrutura muscular (PALKA; DAUN, 1999). O conteúdo de colágeno do *M. longissimus dorsi* suíno foi relatado na faixa de 2,5 a 4,1 mg·g⁻¹ em diferentes estudos (NOLD et al., 1999; KRISTENSEN et al., 2002; VOUTILA et al., 2007a). Ainda, a solubilidade do colágeno nesse músculo varia entre 8,1 e 14,6 % em tratamento térmico de aproximadamente 60 min a 77 °C. Contudo, quando o músculo foi mantido a 90 °C por 120 min, a solubilidade do colágeno variou de 34,5 - 39,2 % (KRISTENSEN et al., 2002; THERKILDSEN et al., 2003). A fração restante pode ser considerada efetivamente insolúvel em calor durante o cozimento rápido. Essa fração é mais estável possivelmente pela alta incidência de ligações cruzadas covalentes. Assim, a resistência ao corte da carne cozida é devida à presença de colágeno mais resistente e reticulado. O perimísio é considerado o compartimento do tecido conjuntivo que mais influencia a resistência da carne cozida e compreende a maior proporção de tecido conjuntivo no músculo (PURSLOW, 2014b).

A maciez do lombo suíno assado está diretamente relacionada às condições de aquecimento aplicadas durante o processo de cocção em forno. A força de cisalhamento aumenta rapidamente com o aumento da temperatura de cozimento (CHIAVARO et al., 2009; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). Menores forças de cisalhamento foram relacionadas a uma menor perda por cozimento, maior CRA, hidrólise térmica de colágeno mais

avançada, além da desnaturação do tecido muscular. Em contrapartida, amostras com sarcômeros mais curtos, menor diâmetro de fibra muscular e maior concentração de fibras por unidade de área de seção transversal do tecido muscular favorecem o aumento dos valores de força de cisalhamento muscular (SZMAŃKO et al., 2021).

2.3.4 Suculência

A suculência é um importante atributo de qualidade alimentar da carne suína cozida. A suculência é a sensação de umidade apreciada nos primeiros movimentos de mastigação, em razão da liberação de líquido pela carne e da percepção de suculência mantida que estimula a salivação (AASLYNG et al., 2003; RØDBOTTEN et al., 2004). A suculência da carne cozida tem relação direta com a qualidade da carne crua e principalmente com o procedimento de cozimento. A temperatura de ponto final da carne, além do tempo e temperatura de cozimento influenciam fortemente a suculência da carne (HEYMANN et al., 1990; BEJERHOLM; AASLYNG, 2004).

Carnes com maior CRA e gordura de marmoreio tendem a serem mais suculentas após o cozimento. A gordura atua como uma espécie de lubrificante durante a mastigação, acentuando a suculência e a maciez da carne (RAMOS; GOMIDE, 2017). Aaslyng e Støier (2004) observaram que o efeito da gordura de marmoreio depende do grau de cozimento da carne. Em carnes cozidas em elevada temperatura interna, a percepção de suculência aumentou com o aumento da quantidade de gordura intramuscular. Por outro lado, a carne cozida em baixa temperatura interna final, em que a suculência é favorecida, os níveis de gordura de marmoreio não alteraram a percepção da suculência. Apesar da associação entre o conteúdo de gordura e suculência, espera-se que o lombo suíno, como um corte magro, preserve boa capacidade de retenção de água e apresente bons teores de suculência.

A determinação experimental de suculência correlacionada aos escores de análise sensorial vem sendo aprofundada com limitações nos últimos anos (LUCHERK et al., 2017). Como alternativa, Lucherck et al (2017) desenvolveram a metodologia para determinação instrumental de suculência baseada em compressão e comprovaram relações diretas entre as medidas objetivas de porcentagem de proteína, perda de cozimento e porcentagem de suco prensado e os escores de suculência do painel sensorial ($r = -0,55$, $r = -0,51$ e $r = 0,45$, respectivamente).

2.3.5 Encolhimento

O encolhimento de carnes cozidas é uma das mudanças físicas mais relevantes durante os processos de cozimento. A redução do volume da carne durante o cozimento raramente é insignificante (ZHENG; SUN; ZHENG, 2007; DU; IQBAL; SUN, 2016). O calor aplicado no cozimento promove desequilíbrio de pressão interna e externa gerando tensões de contração no interior da carne que levam ao seu encolhimento (MAYOR; SERENO, 2004; TORNBORG, 2005). O encolhimento pode ser dimensionado pelas reduções nas dimensões, perímetro, área superficial e volume aparente da peça de carne (MAYOR; SERENO, 2004; DU; SUN, 2005; TORNBORG, 2005; DU; IQBAL; SUN, 2016).

O encolhimento é um fenômeno físico comum observado durante processo de cozimento e merece ser investigado como um parâmetro de qualidade da carne (BARBERA; TASSONE, 2006), pois é comumente relacionado à baixa qualidade pelos consumidores (DIAMANT; WATTS; CLIPLEF, 1976). Contudo, a magnitude dessa retração pode ser controlada mantendo a qualidade da carne assada. Para tanto, o mecanismo de contração e a influência das variáveis do processo de assamento precisam ser entendidos.

Estudos comprovam que o encolhimento afeta a taxa de transferência de calor na estrutura da carne durante o assamento. O encolhimento em carnes assadas reduz a capacidade dos modelos de transferência de calor e massa em prever os perfis de temperatura, umidade, textura e cor durante o processo de assamento de carne (GOÑI; SALVADORI, 2010; KONDJAYAN et al., 2013; BLIKRA; SKIPNES; FEYISSA, 2019). A retração da carne deve ser considerada para prever as alterações que ocorrem durante o cozimento, e a temperatura central da carne, comumente usada para determinar o tempo de cozimento (KONDJAYAN et al., 2013). Além disso, as previsões dos valores dos coeficientes de difusão durante o processo se tornam mais realistas com a consideração do encolhimento no modelo matemático (MAYOR; SERENO, 2004).

2.3.6 Propriedades estruturais de carne assada

O aquecimento promove mudanças consideráveis nas propriedades estruturais, afetando diretamente a qualidade da carne cozida (OFFER et al., 1989; TORNBORG, 2005). Durante o cozimento da carne, a formação de poros é bastante complexa, sendo consequência da própria característica da matéria-prima e do resultado do processo de cozimento, em especial, das condições de processo. Feyissa et al. (2013) afirmam que a desnaturação das proteínas e o encolhimento ocasionados pelo calor dão origem aos poros. Este fato ocorre

porque o encolhimento causa tensões desiguais na peça de carne, criando poros e em um importante aumento na permeabilidade local. A alteração da microestrutura da carne durante o processo de aquecimento desempenha um importante papel no transporte de água. A formação de poros na carne durante o assamento e a transferência de água através deste meio poroso são fundamentais para explicar o perfil de temperatura resultante e conseqüentemente para a qualidade da carne assada (FEYISSA; GERNAEY; ADLER-NISSEN, 2013; WANG et al., 2019).

O conhecimento da estrutura intrínseca dos poros na carne assada é importante para a otimização de condições de assamento e melhorias na qualidade do produto assado. A formação de poros internos na carne cozida resulta em maior porosidade e maior perda de água em carnes cozidas (DU; SUN, 2006). A perda de água e a formação de poros resultam em maiores valores de força de cisalhamento e causam redução da maciez e aumento da coesão, exigindo mais mastigação (DU; IQBAL; SUN, 2016). A formação de poros depende da qualidade da carne crua, pré-tratamento e processamento. Estes fatores influenciam no tamanho dos poros, geometria, porosidade e distribuição de tamanhos na estrutura da carne cozida. A variação nas características dos poros tem vários efeitos no tempo de processamento, no teor de água, na textura e em outros atributos de qualidade das carnes cozidas. Uma estrutura bem arranjada, composta uniformemente por muitos poros pequenos, teria maior capacidade de retenção de água (TORNBORG, 2005; FEYISSA, 2011; DU; IQBAL; SUN, 2016).

2.3.7 Modificação da cor da carne durante o cozimento

2.3.7.1 Mudança de cor de carne assada

As alterações na superfície externa são relacionadas ao desenvolvimento da cor, sabor e características aromáticas da carne assada. Essas alterações são ocasionadas principalmente pela reação de Maillard (RM) e oxidação lipídica, que ocorrem apenas na superfície da carne, onde a temperatura é mais alta em etapa avançada de assamento (ZAMORA; HIDALGO, 2005; KERTH, 2013; FELLOWS, 2016; PURSLOW, 2017). A RM ocorre quando há uma interação entre açúcares redutores com um grupamento amino livre, como aminoácidos, aminas e proteínas em altas temperaturas (AMES, 1992). Esta reação requer aminoácidos, especialmente lisina e alanina, provenientes da carne, além de açúcares redutores, como a glicose ou gorduras oxidantes (RANKEN, 2000; FELLOWS, 2016). São produzidos os compostos responsáveis pelo escurecimento da carne, como compostos coloridos de baixa massa molecular e

melanoidinas de alta massa molecular (KERTH, 2013). A formação de produtos pela RM é afetada pelo tempo, temperatura, pH, umidade, atividade de água e composição do alimento. Dessa forma, as mudanças de cor nas amostras assadas em temperaturas mais altas costumam ser mais intensas (WANG et al., 2019).

A cor superficial marrom-dourado em lombo suíno assado é uma característica desejada para esse produto após o assamento. A cor superficial do lombo suíno é afetada pelo efeito combinado da RM e da exposição da amostra ao ar, sendo influenciada pelas condições de assamento. Maiores tempos e temperaturas de assamento contribuem com maiores mudanças de cor na superfície da carne. A baixa umidade na cavidade do forno favorece a formação de crosta na superfície da carne e a ocorrência da RM, com a formação dos compostos do escurecimento. Carnes assadas geralmente têm seus parâmetros L^* reduzidos e parâmetros a^* e b^* crescentes (AASLYNG et al., 2003; VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; WANG et al., 2019).

A cor marrom acinzentado de lombo suíno assado também está relacionada à desnaturação térmica de proteínas heme, como mioglobina e hemoglobina (CHIAVARO et al., 2009). Esta cor característica é identificada como cor de superfície e cor interna na carne nas etapas inicial e avançada do assamento, respectivamente. A mioglobina desnaturada pelo calor expõe o heme, liberando oxigênio e favorecendo a cor marrom (LAWRIE; LEDWARD, 2006; FELLOWS, 2016). O aumento da temperatura do ponto final aumenta a cor marrom e diminui a cor rosa no domínio interno da carne (CHIAVARO et al., 2009; BOWERS et al., 2012; KONDJOYAN et al., 2014). A cor interna é menos afetada pelas condições de processo (CHIAVARO et al., 2009; BOWERS et al., 2012).

2.3.7.2 Indicadores de Reação de Maillard na crosta de carne assada

A formação de produtos da RM na matriz alimentar tem consequências nutritivas e efeitos biológicos que devem ser considerados, pois tanto benefícios como possíveis riscos podem ser apontados (DELGADO-ANDRADE et al., 2010; PORTO BARBOSA et al., 2016; WANG et al., 2021). A RM em alimentos proteicos pode ter efeitos negativos sobre a qualidade nutricional das proteínas. Entre as modificações induzidas sobre o valor nutritivo, o decréscimo da digestibilidade proteica, redução da biodisponibilidade da lisina e de outros aminoácidos essenciais e mesmo a formação de substâncias tóxicas (AMES, 1992; NUNES; BAPTISTA, 2001). A RM ocorre em três fases: inicial, intermediária e final. Cada fase forma determinados

produtos (indicadores) que indicam o progresso da reação, favorecida pelo tratamento térmico (HODGE, 1953; TREVISAN et al., 2016).

A lisina é um dos aminoácidos mais reativos nos estágios iniciais da RM e é degradada com o avanço da reação. A degradação da lisina pode ser quantificada pela determinação do composto furosina (ϵ -N-furoilmetil-L-lisina), formado durante a hidrólise ácida dos produtos de Amadori (frutosil-lisina, lactulosil-lisina e maltulosil-lisina). Na fase inicial da RM, os compostos de Amadori sofrem desidratação e fragmentação, gerando compostos incolores que não são absorvidos no espectro visível. Por essa razão, a formação dos primeiros compostos de baixa massa molecular pode ser monitorada indiretamente pela medida da absorbância (solução de compostos extraídos) a 280 nm (MORALES; JIMÉNEZ-PÉREZ, 2004; DELGADO-ANDRADE et al., 2010; TREVISAN et al., 2016).

Com o avanço da reação, os compostos intermediários são formados por meio de uma série de reações sequenciais e paralelas. Como produtos intermediários da reação, podem ser quantificados o hidroximetilfurfural (HMF) e o furfural (DELGADO-ANDRADE et al., 2010). Na etapa intermediária também ocorre o desenvolvimento de fluorescência e de absorção no ultravioleta (formação de compostos de coloração amarelada) (BALTES, 1982). A formação de compostos fluorescentes quantificados pelos comprimentos de onda 247 nm (excitação) e 415 nm (emissão) se inicia na fase intermediária da RM e progride paralelamente à formação de melanoidinas na fase avançada. Desta forma, estes compostos são também chamados de compostos intermediários fluorescentes (MORALES; VAN BOEKEL, 1997; MORALES; JIMÉNEZ-PÉREZ, 2004).

Na fase final da RM, os compostos formados na fase intermediária podem reagir com aminoácidos polimerizando-se e dando origem às melanoidinas, pigmentos de cor marrom com peso molecular variável e cromóforos com absorbância máxima de 420 nm (MORALES; JIMÉNEZ-PÉREZ, 2004). Ainda na etapa final da RM, ocorre o aumento da formação de compostos fluorescentes (BALTES, 1982). Dessa forma, a medida de fluorescência é um bom indicador para se avaliar o dano térmico em alimentos (DELGADO-ANDRADE et al., 2007).

Nas fases intermediária e avançada da RM podem ser formados os produtos de glicação avançada (PGAs). Estes compostos apresentam fator patogênico implicado no diabetes e outras doenças crônicas. Alimentos ricos em proteínas e gorduras como a carne favorecem níveis mais altos de PGAs (CHEN; SCOTT, 2015). Contudo, métodos para a quantificação desses compostos estão associados a problemas e limitações significativas. Como alternativa, a fluorescência total de PGAs com excitação e emissão de comprimentos de onda de 350 e 450 nm, respectivamente, é usada para investigar a formação PGAs. O efeito do cozimento na

formação de compostos de RM e PGAs na carne ainda é pouco explorado, mas pode ser avaliado pela fluorescência dos compostos (YAMAGUCHI et al., 2012).

Os compostos fluorescentes são reconhecidos como importantes marcadores da RM (MORALES; VAN BOEKEL, 1997). As informações sobre a formação destes compostos em carnes cozidas são escassas e correlacionam com as condições de tratamento térmico aplicadas. O aumento exponencial da formação de compostos fluorescentes durante o assamento de hambúrguer de carne em função da temperatura de assamento ($R^2 = 0,973$) foi observado por Trevisan et al. (2016). Além disso, foram encontradas fortes correlações entre compostos fluorescentes com parâmetros de cor de hambúrguer assado. Uma correlação inversa entre compostos fluorescentes e os valores de L^* ($R^2 = -0,992$; $p = 0,026$) e correlação positiva entre compostos fluorescentes e os valores a^* ($R^2 = 0,9272$; $p = 0,023$). Este fato corrobora a cor como um indicador não específico da extensão da RM (TREVISAN, 2015).

Outro indicador de RM útil para identificar a fase intermediária da RM é o HMF. O HMF é um composto de baixa massa molecular, formado quando os açúcares hexose participam da RM em condições de baixo pH, como é o caso da carne. As informações sobre o conteúdo de HMF em carnes, especialmente lombo suíno assado, são muito limitadas na literatura (DANOWSKA-OZIEWICZ; KARPIŃSKA-TYMOSZCZYK; BOROWSKI, 2007).

A formação dos produtos da RM são altamente dependentes das condições de cozimento e ponto final de carne cozida (GIBIS, 2016; CHOUDHARY et al., 2020). Para tanto, a geração de compostos tóxicos em carne assada é favorecida em altas temperaturas e maiores tempos de cozimento (DANOWSKA-OZIEWICZ; KARPIŃSKA-TYMOSZCZYK; BOROWSKI, 2007; STAROWICZ; ZIELIŃSKI, 2019). O processo de cocção em fornos envolve altas temperaturas de cozimento e precisa ser avaliado quanto aos possíveis compostos que podem ser formados. Os compostos devem ser avaliados em condições fixas e controladas durante o assamento, para que se identifique os efeitos que as variáveis de cozimento têm sobre os indicadores da RM.

2.3.7.3 Efeito da oxidação lipídica na reação de Maillard frente ao escurecimento não enzimático em carne assada

O escurecimento não enzimático em carne assada provavelmente tem a contribuição da oxidação lipídica na reação de Maillard. A oxidação lipídica não enzimática ou autooxidação de gorduras ocorre por meio de mecanismos típicos de radicais livres e seus produtos iniciais são os hidroperóxidos. Estes produtos são instáveis e resultam em diferentes compostos por

meio de reação complexas envolvendo aminas, aminoácidos e proteínas, sendo relacionados ao escurecimento em alimentos gordurosos durante o processamento (POKORNÝ, 1998; HIDALGO; ZAMORA, 2000). De acordo com a literatura, as reações são inter-relacionadas e devem ser consideradas simultaneamente para entender as vias e produtos da reação de Maillard na presença de lipídios, e devem ser incluídas em uma via geral que pode ser iniciada tanto por lipídios quanto por carboidratos na formação de melanoidinas. Ambas as reações seguem vias gerais de reação semelhantes, do ponto de vista do escurecimento não enzimático, tendo como produto final, pigmentos castanho escuros (ZAMORA; HIDALGO, 2005). Além disso, os produtos da oxidação lipídica são capazes de modificar a reação de Maillard, promovendo a reação ou reagindo com alguns intermediários produzindo compostos diferentes daqueles comumente formados na ausência de lipídios, como por exemplo, o desenvolvimento de aroma em carnes cozidas (MOTTRAM; EDWARDS, 1983; ZAMORA; HIDALGO, 2005). Além disso, a interferência da oxidação lipídica nos produtos indicadores de Maillard é mais pronunciada com alta proporção de ácidos graxos poli-insaturados (MACLEOD; SEYYEDAIN-ARDEBILI, 1981; DINH; TO; SCHILLING, 2021). Como o lombo suíno é um característico corte magro, com baixo teor de gordura, vale considerar a oxidação lipídica como potencial contribuinte para o escurecimento não enzimático na crosta assada.

O escurecimento em carnes assadas geralmente ocorre de maneira acentuada onde a crosta superficial é desidratada em altas temperaturas. Dessa forma, os ácidos graxos são extensivamente oxidados na superfície, na qual aldeídos derivados de lipídios são participantes ativos na reação de Maillard, produzindo alguns dos voláteis mais característicos do aroma de carne assada (WASSERMAN, 1972). Dessa forma, as interações entre os produtos de oxidação lipídica e os compostos de Maillard são mais importantes para o desenvolvimento de características sensoriais de carne cozida do que se pensava inicialmente (DINH; TO; SCHILLING, 2021). Este fato justifica a importância de mais estudos relacionados ao tema desse trabalho.

2.3.7.4 Formação de crosta em carne assada

A cor superficial e a crosta são importantes características de qualidade do lombo suíno assado. O assamento costuma promover a secagem na superfície externa da carne, que favorece a importante e complexa formação da crosta. Durante a formação de crosta ocorre desnaturação de proteínas musculares, que perdem capacidade de retenção de água e se retraem. A formação de crosta ocorre com o baixo teor de umidade da superfície e é induzida quando a taxa de

evaporação da água da superfície da carne é maior que a difundida da zona interna para a externa (MCDONALD; SUN, 2001). Esta crosta é uma superfície seca porosa que sela a carne, possibilitando que menores quantidades de umidade migrem para fora do alimento (TORNERG, 2005; CHIAVARO et al., 2009; FELLOWS, 2016). Em contrapartida, a presença de vapor na cavidade do forno durante o assamento reduz a taxa de evaporação da água da superfície e retarda a formação da crosta na carne (VITTADINI et al., 2005). As condições de assamento na superfície da carne nos diferentes tratamentos de cozimento influenciam a formação de crosta superficial e podem explicar as diferenças encontradas entre as cores superficiais (CHIAVARO et al., 2009). A formação da crosta na carne assada ainda é pouco explorada e não foram encontrados trabalhos que avaliaram e caracterizaram a formação de crosta em lombo suíno assado.

CAPÍTULO 3

3 EVOLUÇÃO DA COR E CROSTA DE LOMBO SUÍNO ASSADO EM CAVIDADE DE FORNO COM TEMPERATURA CONTROLADA

3.1 INTRODUÇÃO

A crosta marrom dourada é uma camada porosa seca que envolve o interior suculento da carne e é sensorialmente desejada pelo consumidor de lombo suíno assado. Além disso, a cor é um relevante atributo sensorial que afeta diretamente a qualidade geral e aceitação de carnes processadas (HUMAID et al., 2019; CHANG et al., 2021). As características sensoriais específicas de carne assada são desenvolvidas na superfície externa da carne onde a temperatura é mais alta principalmente pela reação de Maillard (KERTH, 2013; FELLOWS, 2016; PURSLOW, 2017). Os pigmentos de melanoidinas marrons responsáveis pela cor, antioxidantes e compostos que afetam o aroma e sabor são desenvolvidos quando há interação entre açúcares redutores e/ou lipídios e aminoácidos ou grupos amino em proteínas (AMES, 1992; ZAMORA; HIDALGO, 2005). Na carne, esta reação requer aminoácidos, especialmente lisina e alanina, além de açúcares redutores, como glicose ou lipídios oxidantes (FELLOWS, 2016). Além da reação de Maillard, a oxidação lipídica também deve contribuir para a formação de compostos citados acima. Dessa forma estas reações devem ser consideradas simultâneas durante o tratamento térmico de carnes (ZAMORA; HIDALGO, 2005; CHANG et al., 2021). Por fim, a composição do alimento e as condições de cozimento podem viabilizar diferentes vias das reações de Maillard e oxidação lipídica, originando a produção de compostos específicos. Lembrando que as reações de escurecimento não enzimático em carnes ocorrem somente após o início da formação de crosta com avançadas transferências de calor e massa.

As transferências de calor e massa e a formação de crosta são simultâneos, uma vez que esses fenômenos de transporte levam à formação da fina camada seca que encobre a carne, enquanto a estrutura da crosta afeta as propriedades de transferência (FEYISSA; GERNAEY; ADLER-NISSEN, 2013; PORTANGUEN et al., 2014). No desenvolvimento da crosta ocorre a aglomeração de proteínas devido à desnaturação térmica e redução da capacidade de retenção de água. Dessa forma, a formação de crosta é promovida pelo baixo teor de umidade local com o aumento da temperatura superficial. Em destaque, a desnaturação e as mudanças de conformação estrutural das proteínas durante o tratamento térmico, podem reduzir a

digestibilidade, especialmente pela agregação de proteínas em altas temperaturas (ZHOU et al., 2018, 2019).

Os efeitos térmicos do processo de assamento na crosta de lombo suíno e carnes em geral são relevantes e pouco explorados até o momento. Além disso, o efeito das condições de cozimento é ainda menos descrito na literatura. Sabendo disso, o lombo suíno (*longissimus dorsi*) como um corte altamente valorizado e comumente utilizado em preparos culinários, merece atenção em forma de estudos focados em formação de crosta e mudanças de cor durante a cocção em forno. A evolução de cor e desenvolvimento de crosta em carnes assadas foi motivação de alguns estudos fundamentais (CHIAVARO et al., 2009; KONDOYAN et al., 2016; MOYA et al., 2021; PORTANGUEN et al., 2014; WANG et al., 2019). Contudo, pode-se afirmar que a evolução de cor durante o assamento de carnes é extremamente sensível a variação de temperatura. Em geral, a avaliação de tal propriedade física não tem controle minucioso da temperatura pontual, muito menos o controle das condições de processo na cavidade de forno.

Pensando nisso, faz-se necessário o monitoramento de perfis de temperatura, umidade e mudança de cor abrangendo os parâmetros L^* (preto/branco), a^* (vermelho/verde), b^* (amarelo/azul) e ΔE^* (Evolução total de cor) em cavidade com temperatura controlada. Além disso, por meio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier pode favorecer a compreensão de reações de escurecimento não enzimático e mudanças de conformação em proteínas (CALABRÒ; MAGAZÙ, 2020). Como estratégia experimental, se faz necessário o uso de forno com controle de temperatura de parede que permite obter com precisão as propriedades físico-químicas de crosta de lombo suíno durante o assamento para diferentes temperaturas de processo (SILVA et al., 2022). Por meio de dados precisos e representativos do processo de assamento de lombo suíno, pode-se obter modelos matemáticos preditivos quanto à evolução de cor.

O interesse em registrar as mudanças físico-químicas na crosta de lombo suíno assado motivou o presente estudo a validar o controle de temperatura em uma cavidade de forno adaptado durante o assamento de lombo suíno e analisar o efeito da temperatura de assamento na evolução dos perfis de temperatura, variação de massa, cor (a^* , b^* , L^* e ΔE^*), formação de crosta e caracterizar possíveis indicadores de reações de oxidação lipídica e Maillard. Além disso, modelar os parâmetros de cor em função da temperatura da superfície.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Matéria-prima

Lombo suíno (*M. longissimus dorsi*, constituído de duas porções *longissimus thoracis* e *longissimus lumborum*) resfriado foi adquirido diretamente de um frigorífico (Pamplona Alimentos S/A). O lombo suíno adquirido é proveniente de animais abatidos com média de 120 kg, variando, de machos e fêmeas, das raças Landrace e Large White. Para padronização, as peças de lombo suíno de aproximadamente 3 kg, embaladas a vácuo, foram armazenadas a 4 ± 1 °C, até o momento da utilização nos experimentos (Figura 4).

Figura 4 – Fotografia ilustrando o padrão dos lombos suínos utilizados nos experimentos.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

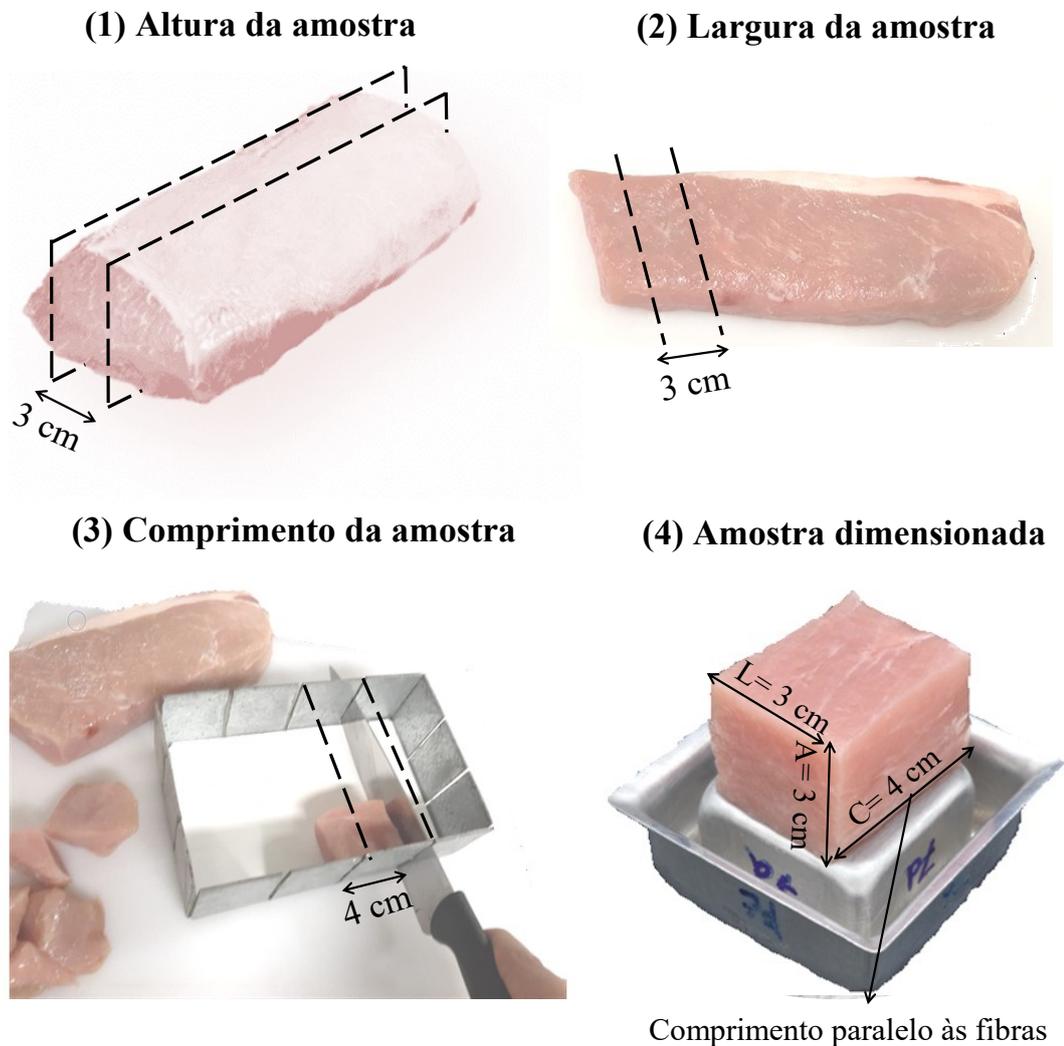
A umidade inicial, pH e cor foram os parâmetros considerados para seleção da matéria-prima adequada, favorecendo o uso de lombo suíno classificado como normal. Lombos caracterizados como PSD e DFD foram desclassificados. Os parâmetros utilizados para classificar os lombos suínos normais foram baseados em valores de pH no intervalo de 5,6 a 5,9 (NPPC, 1998), e cor (luminosidade, L^*) no intervalo de $45 \leq L^* \leq 53$ (MAGANHINI et al., 2007). A umidade inicial de cada peça foi determinada pela metodologia AOAC 950.46 (AOAC, 1997). A análise de pH foi realizada com pHmetro para sólidos (Testo, modelo testo 205, Lenzkirch, Alemanha), realizando-se quatro medições no interior de cada músculo. O parâmetro L^* foi obtido em superfície de fatias representativas de lombo suíno expostas ao ar por 10 min (CHANNON; PAYNE; WARNER, 2000). Os parâmetros de cor das amostras de lombo suíno foram determinados por meio de um sistema de visão computacional, conforme

descrito por Cárdenas-Pérez et al. (2017), com adaptações. O sistema usa uma câmera fotográfica (Nikon D5500, Nikon Corporation, Japão) para aquisição de imagens fotográficas de fatias do lombo. Essas imagens, com as cores codificadas no sistema RGB, foram recodificadas para o sistema CIELAB, usando um aplicativo (*plug-in*) para o software ImageJ v. 1.6.0 (National Institutes of Health, Bethesda, MD, EUA). Foi utilizado o *plug-in* Color Space Converter para a conversão do sistema RGB para a escala CIELAB, resultando em medidas de cor expressas em termos de luminosidade L^* ($L^* = 0$ preto e $L^* = 100$ branco) e da cromaticidade, definida por a^* ($+a^* =$ vermelho e $-a^* =$ verde) e b^* ($+b^* =$ amarelo e $-b^* =$ azul).

As peças de lombo foram fracionadas manualmente para obter amostras retangulares (30 x 30 x 40 mm), com aproximadamente 40 g. Essa geometria dos cortes permitiu o posicionamento preciso dos sensores de temperatura em diferentes posições internas da carne e medir as dimensões da carne assada após a retração. Além disso, a amostra de tal geometria na direção das fibras da carne pode permitir a representação minuciosa da alteração nas propriedades físicas da carne durante o assamento. Posteriormente, tal comportamento deve ser validados em maiores pedaços de carne.

A Figura 5 ilustra as etapas do preparo da amostra. As amostras tiveram suas dimensões padronizadas utilizando utensílio com dimensões fixas, embrulhadas em filme plástico e armazenadas sob refrigeração a 4 ± 1 °C. Antes de assar, as amostras foram mantidas em temperatura ambiente por aproximadamente 20 min. Em seguida, as amostras foram pesadas, medidas e a temperatura aferida, por fim submetidas ao assamento em temperatura selecionada.

Figura 5 - Representação do método de preparação de amostras de lombo suíno para análise. Etapa 1: divisão do lombo inteiro com cortes longitudinais de 3 cm de espessura (definindo a altura da amostra); Etapa 2: corte paralelo às fibras musculares (definindo a largura da amostra). Etapa 3: Aparas laterais do corte obtido na etapa anterior (definindo o comprimento). Etapa 4: amostra com dimensões padronizadas e certificadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.2 Unidade experimental

Os experimentos de assamento da carne foram realizados em um forno adaptado a partir de um forno mufla (EDG 1800 EDGCON 1P, Brasil) com um espaço de 96 mm x 96 mm x 150 mm, conforme ilustrado na Figura 6. O sistema de aquecimento do forno é constituído de resistências de dissiliceto de molibdênio em espiral localizadas nas suas laterais. O isolamento externo é composto por zircônia microporosa (Zircar Ceramics, Microsil, Estados Unidos). A temperatura do forno foi controlada utilizando um controlador PID (modelo REX –

C100) fixado na posição superior central da face traseira do forno. A cavidade conta com uma célula de carga (Tedea-Huntleigh Modelo 1006, VPG transducers, Estados Unidos) com capacidade de 5 kg e exatidão de 0,2 g, ligada a um sistema de aquisição de dados conectado a um computador por interface eletrônica. Além disso, o sistema conta com um conjunto de termopares do tipo T e tipo K conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent Technologies, Modelo – 34970A, Estados Unidos). Uma descrição completa da construção do forno pode ser encontrada em Silva et al., 2022.

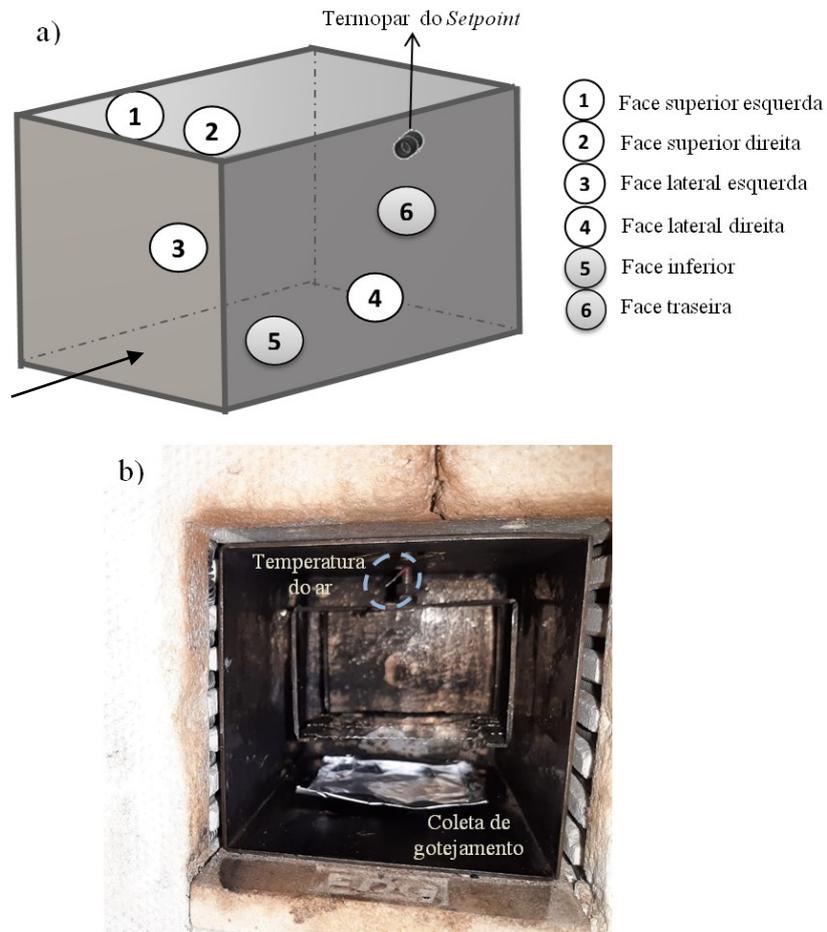
Figura 6 - (a) Vista externa e (b) vista da entrada da cavidade do forno mufla adaptado.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O sistema experimental de estudo do cozimento de peças de carne por assamento é um forno dotado de termopares posicionados para medir a homogeneidade da temperatura na cavidade e paredes, como ilustrado na Figura 7. Para monitorar as temperaturas das paredes externas do forno, termopares tipo K (Chromel/Alumel) revestidos com fibra de vidro foram soldados com prata nas faces externas da cavidade. Para monitorar a temperatura do ar do interior do forno um termopar tipo T (Iope, Modelo - A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil) foi posicionado conforme Figura 7b. A perda de massa da amostra por gotejamento foi coletada no fundo do forno com um recipiente de folha de alumínio (Figura 7b).

Figura 7 – (a) Esquema da posição dos termopares e (b) cavidade do forno mufla adaptado.

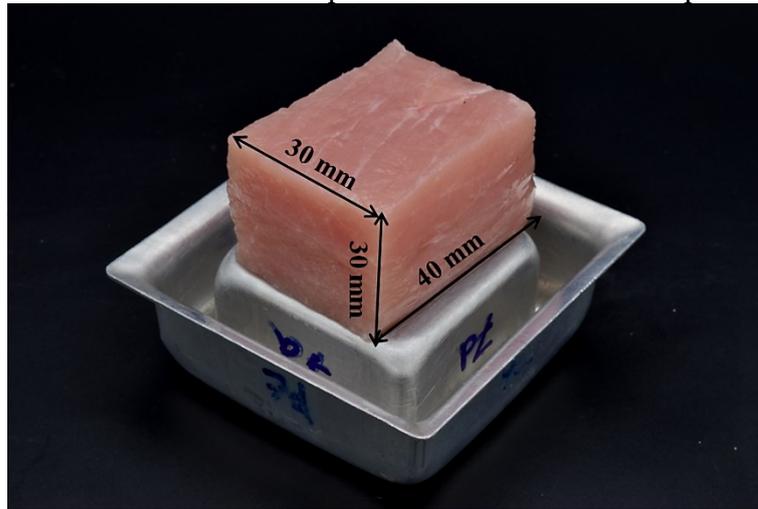


Fonte: Adaptado de Silva (2022).

3.2.3 Processo de assamento de lombo suíno

As amostras de carne foram assadas no forno mufla adaptado (EDG Equipamentos 1800 1P, Brasil) sem convecção forçada, em três condições de temperatura, 180, 200 e 220 °C. Para o experimento de assamento, uma amostra (um cuboide) foi suspensa em fios de alumínio de uma plataforma (Figura 7b). A amostra devidamente dimensionada é ilustrada na Figura 8. A amostra foi disposta em no suporte posicionado a uma altura de 30 mm da base do forno. Cada um dos experimentos foi realizado em triplicata, para cada condição de assamento.

Figura 8 – Amostra com dimensões padronizadas e certificadas para o assamento.



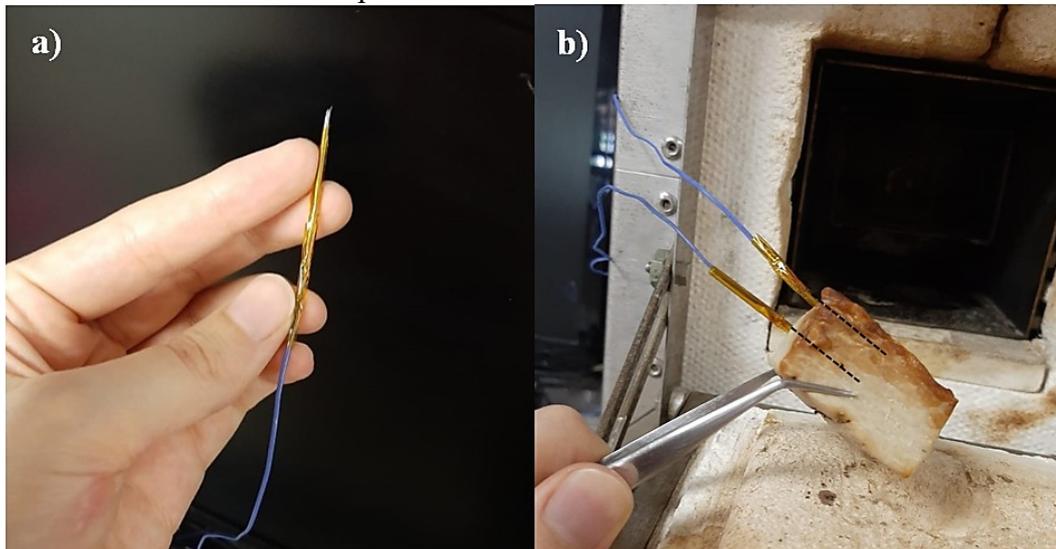
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As amostras de carne foram assadas no forno durante 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 min, para cada condição de assamento. A amostra foi retirada do forno e exposta a temperatura ambiente ($\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 30 min, antes de seguir com a caracterização. Foram obtidas as cinéticas de variação das propriedades do lombo suíno assado em temperaturas de 180, 200 e 220 $^{\circ}\text{C}$. Foram determinados a temperatura, a variação de massa (umidade global e local), parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* e ΔE) e espessura de crosta. Ensaios de FTIR-ATR foram realizados em amostras de crosta de lombo suíno crua e assadas, além de extrair o pigmento marrom dessas amostras e analisar seus espectros de UV-Vis e FTIR.

3.2.4 Perfis de temperatura

A evolução temporal da temperatura na carne durante o assamento foi realizada posicionando dois termopares do tipo T (Iope, Modelo - A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil) na amostra. Os termopares utilizados foram adaptados para maior resistência mecânica e exatidão de posicionamento na amostra. Termopares foram inseridos no interior de uma agulha e envolvidos com fita isolante, como ilustrado na Figura 9a. Isso foi feito para reduzir a condução de calor para o interior da carne. Um termopar foi introduzido no centro da amostra, enquanto o outro foi fixado na superfície, no topo central da amostra, como ilustra a Figura 9b. As temperaturas das faces da caixa do forno foram medidas durante o processo de assamento, com os termopares tipo K posicionados conforme a Figura 7 (item 2.2.2). O registro dos dados foi realizado com um sistema de aquisição (Agilent Technologies, Modelo – 34970A, Estados Unidos), com intervalo de 10 segundos, durante todo o processo de assamento.

Figura 9 - (a) Adaptação de termopar com agulha e revestimento isolante; (b) Posição dos termopares na amostra de lombo suíno.

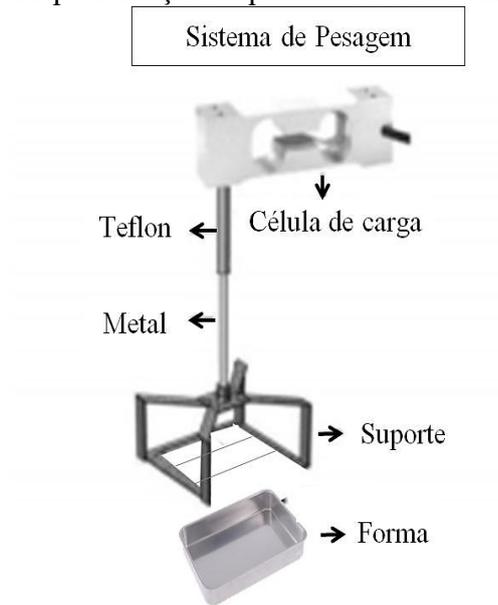


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.5 Variação de Massa

A variação da massa durante o cozimento da carne foi obtida com uma célula de carga do tipo single point (Tedeia-Huntleigh Modelo 1006, VPG transducers, Estados Unidos). A célula de carga foi conectada a um sistema de aquisição de dados e a um computador por uma interface eletrônica (Alfa Instrumentos, Modelo - 3102, Brasil), e os dados foram obtidos em intervalos de 1 segundo. Para quantificar a perda de massa foi desenvolvido um suporte com uma haste para sustentar somente a amostra. As perdas por gotejamento (sólidos e líquidos) foram coletadas por recipiente disposto na base do forno, sem contato com a célula de carga. O suporte foi acoplado a uma haste de metal, que foi conectada a um cilindro de teflon que atuará como isolante, reduzindo a fuga de calor através da haste de metal. A haste foi instalada de forma que o metal ficou dentro do forno, enquanto que o teflon permaneceu no exterior, conectado à célula de carga (SILVA et al., 2022). O esquema do sistema de pesagem é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Representação esquemática do sistema de pesagem.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2022).

A umidade global das amostras, assim como as umidades da crosta superior, crosta inferior e centro foram determinadas por gravimetria e expressas em unidade de base seca.

3.2.5.1 Umidade Global

A massa inicial ($m_{u(t=0)}$) do lombo suíno foi obtida utilizando-se os dados de massa medidos *on line* pela célula de carga, enquanto a massa final ($m_{s(t)}$) foi determinada no final do processo de assamento pelo teor de matéria seca. Em posse destes dados, a variação de massa foi convertida em umidade global em base seca (b.s), a partir da Equação 1.

$$Umidade (b.s) = \frac{(m_{u(t=0)} - m_{s(t)})}{m_{s(t)}} \quad (1)$$

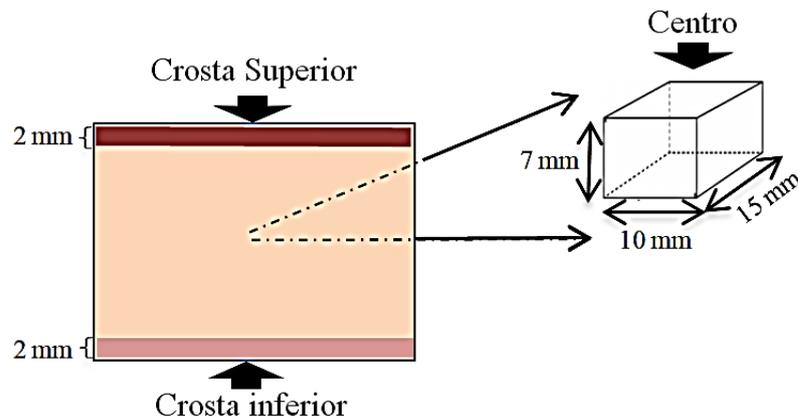
onde Umidade (b.s) é o teor de água em base seca, $m_{u(t=0)}$ é a massa da amostra úmida no tempo zero (g) e $m_{s(t)}$ é a massa da amostra assada em um tempo qualquer (g).

3.2.5.2 Umidade Local Média

Em experimento paralelo ao realizado utilizando a célula de carga, a umidade pontual foi realizada a partir de experimentos individuais de assamento, para os tempos de assamento

de 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 min. A Figura 11 mostra o esquema da amostragem para determinação das umidades locais. A amostra foi retirada do forno e ainda aquecida, foi cortada (subamostrada) para a determinação das umidades médias em três regiões. A primeira amostra foi uma fatia com espessura de 1,5 a 2 mm da crosta superior. A segunda foi um cuboide retangular de aproximadamente 10 mm x 7 mm x 15 mm (largura x altura x comprimento) localizado no centro da amostra; a terceira foi retirada da crosta inferior, com espessura de aproximadamente 1,5 a 2 mm. As amostras foram acondicionadas em tubos *falcon* (previamente pesados) até atingirem a temperatura ambiente. Em seguida, os tubos com as amostras foram pesados novamente para se obter a massa úmida da amostra.

Figura 11 - Esquema de extração de subamostras para determinação das umidades locais médias.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.6 Cor

Os parâmetros de cor de lombo suíno foram determinados utilizando um sistema de visão computacional (CÁRDENAS-PÉREZ et al., 2017) com adaptações. As imagens foram capturadas usando uma câmera digital colorida (Nikon D5500, Nikon Corporation, Japão) de resolução 4496×3000 pixels no interior de uma câmara de fundo preto equipada com luz branca (Padrão de iluminação D65). As imagens foram coletadas em tempos de assamento de 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 min. As imagens digitais foram convertidas do sistema RGB para a escala CIELab pelo plug-in *Color Space Converter* no software ImageJ (Instituto Nacional de Saúde, Bethesda, MD, EUA). Os dados das imagens no espaço de cor CIEL*a*b* permitiram obter os parâmetros L^* (preto/branco), a^* (vermelho/verde) e b^* (amarelo/azul) definidos pela CIE (*Commision Internationale de L'Éclairage*) (CIE, 1978). A evolução de cor

total (ΔE) foi determinada a partir da Equação 2, assumindo como referência a cor da carne crua:

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

3.2.7 Espessura da crosta

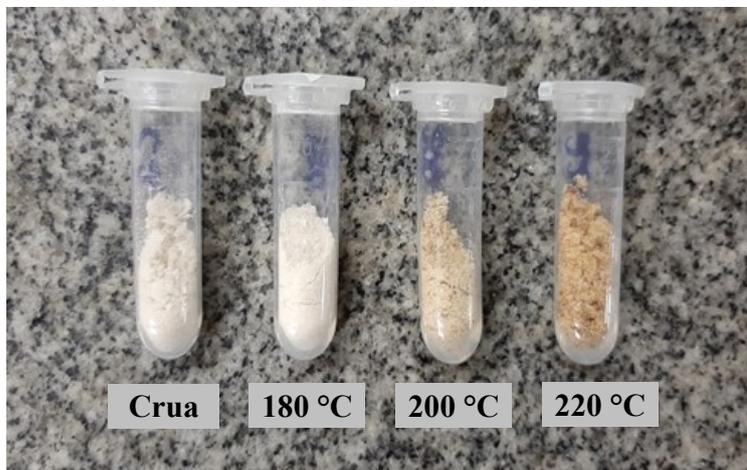
A espessura da crosta foi obtida em 40 min de assamento para cada temperatura. Amostras de carne assada foram cortadas perpendicularmente à direção das fibras musculares. A seção transversal foi fotografada juntamente com uma escala, usando uma câmera digital colorida (Nikon D5500, Japão) de resolução 4496×3000 pixels em uma câmara colorimétrica de fundo preto equipada com luz branca (Padrão de iluminação D65). A espessura da crosta de cor marrom foi dimensionada usando o software ImageJ (Instituto Nacional de Saúde, Bethesda, MD, EUA). Para cada cubo de carne foi realizada uma varredura na crosta tomando 10 medidas nas 6 diferentes porções transversais.

3.2.8 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em crostas de lombo suíno

As modificações estruturais e químicas das amostras de carne crua e carne assada podem ser rastreadas por espectroscopia FTIR. A agregação de proteínas e o avanço de reações de escurecimento envolvendo oxidação lipídica e reação de Maillard também podem ser monitoradas em função das condições de cozimento (CALABRÒ; MAGAZÙ, 2020). A análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier de reflexão total atenuada (FTIR-ATR) foi baseada no método de (ZHENG et al., 2021). Foram analisadas as amostras crua e da crosta superior de lombo suíno assado por 40 min a 180, 200 e 220 °C. As amostras foram liofilizadas e moídas até a formação de pó antes da análise (Figura 12). As crostas liofilizadas em pós e o Brometo de potássio (KBr) foram moídos uniformemente na proporção de 1:100. Os espectros de FTIR foram obtidos usando um espectrômetro FTIR (Lambda 45; Perkin Elmer, Singapore), equipado com um dispositivo de refletância total atenuada (ATR) contendo cristal de ZnSe. A varredura foi realizada na faixa de número de onda de 4000-400 cm^{-1} a uma resolução de 2 cm^{-1} e comparados com o espectro de KBr puro em temperatura

ambiente (25 °C). Os espectros de transmitância foram processados com o software OriginPro2018.

Figura 12 - Amostras de lombo suíno crua e assadas liofilizadas e moídas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.9 Análise de pigmento marrom da crosta

3.2.9.1 Processo de extração

A extração do pigmento marrom foi realizada pelo método de Lu et al. (2019). Foram utilizados 1 g de crosta de lombo suíno assado e 10 mL de álcool etílico absoluto 85 %. A solução foi submetida a tratamento ultrassônico por 32 min (25 °C, 100 W) e depois centrifugada a 4500 g por 30 min. O sobrenadante foi filtrado em papel filtro qualitativo e o filtrado foi definido como a solução de pigmento marrom. O extrato foi armazenado ao abrigo de luz. Para identificar o pigmento marrom extraído foram realizadas análises de espectroscopia no ultravioleta visível (UV-Vis) e FTIR.

3.2.9.2 UV-Vis de pigmento marrom

Os extratos de pigmento marrom obtidas em álcool etílico absoluto 85 % foram avaliadas em espectrofotômetro (Lambda 45; Perkin Elmer, Singapore) na faixa espectral de 190-800 nm. Foram analisadas amostra crua e assadas até atingir 75 °C no centro geométrico e por 40 min a 180, 200 e 220 °C.

3.2.9.3 FTIR de pigmento marrom

As soluções de pigmento marrom correspondentes às amostras de lombo suíno crua e assadas por 40 min a 180, 200 e 220 °C foram utilizadas para análise de FTIR. As amostras foram gotejadas em pellets de KBr e secas. Os espectros foram registrados usando um espectro FTIR (Cary 600, Agilent, USA) na faixa de frequência de 4.000-400 cm⁻¹ a uma resolução de 4 cm⁻¹ e comparados com o espectro de KBr puro em temperatura ambiente (25 °C). Os espectros de transmitância foram processados com o software OriginPro2018.

3.2.10 Análise dos resultados

Médias e desvios padrão foram calculados com o software estatístico OriginPro 2018. Todos os experimentos foram realizados em triplicata. Os resultados foram expressos em média ± desvio padrão. O desenvolvimento da cor da crosta de lombo suíno durante o assamento foi modelado matematicamente. O desempenho dos modelos propostos foi medido comparando valores experimentais e previstos. Para esse objetivo, foram calculados a raiz quadrada do erro médio (RMSE – Equação 3) e o fator de determinação (R² - Equação 4).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Z_{fi} - Z_{oi})^2}{N}} \quad (3)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum (Z_{fi} - \bar{Z}_{fi})(Z_{oi} - \bar{Z}_{oi})}{\sqrt{\sum (Z_{fi} - \bar{Z}_{fi}) \sum (Z_{oi} - \bar{Z}_{oi})^2}} \right)^2 \quad (4)$$

Onde Z_f é o valor previsto, Z_o é o valor observado, e N é o tamanho da amostra.

A cor superficial da carne pode sofrer mudanças em função da temperatura da crosta superior. Diante dessa hipótese foram propostos os modelos lineares e sigmóides dos parâmetros de cor do espaço CIE L*a*b* em função da temperatura da superfície (T_{Sup}) a partir das Equações 5 e 6, respectivamente.

$$Y^* = a + bT_{Sup} \quad (5)$$

Onde Y^* é a evolução do parâmetro de cor (L*, a* ou b*), a e b são parâmetros estimados para cada uma das curvas ajustadas.

$$Y^* = Y_{\infty}^* + \frac{Y_0^* - Y_{\infty}^*}{1 + \left(\frac{T_{Sup}}{T_C}\right)^k} \quad (6)$$

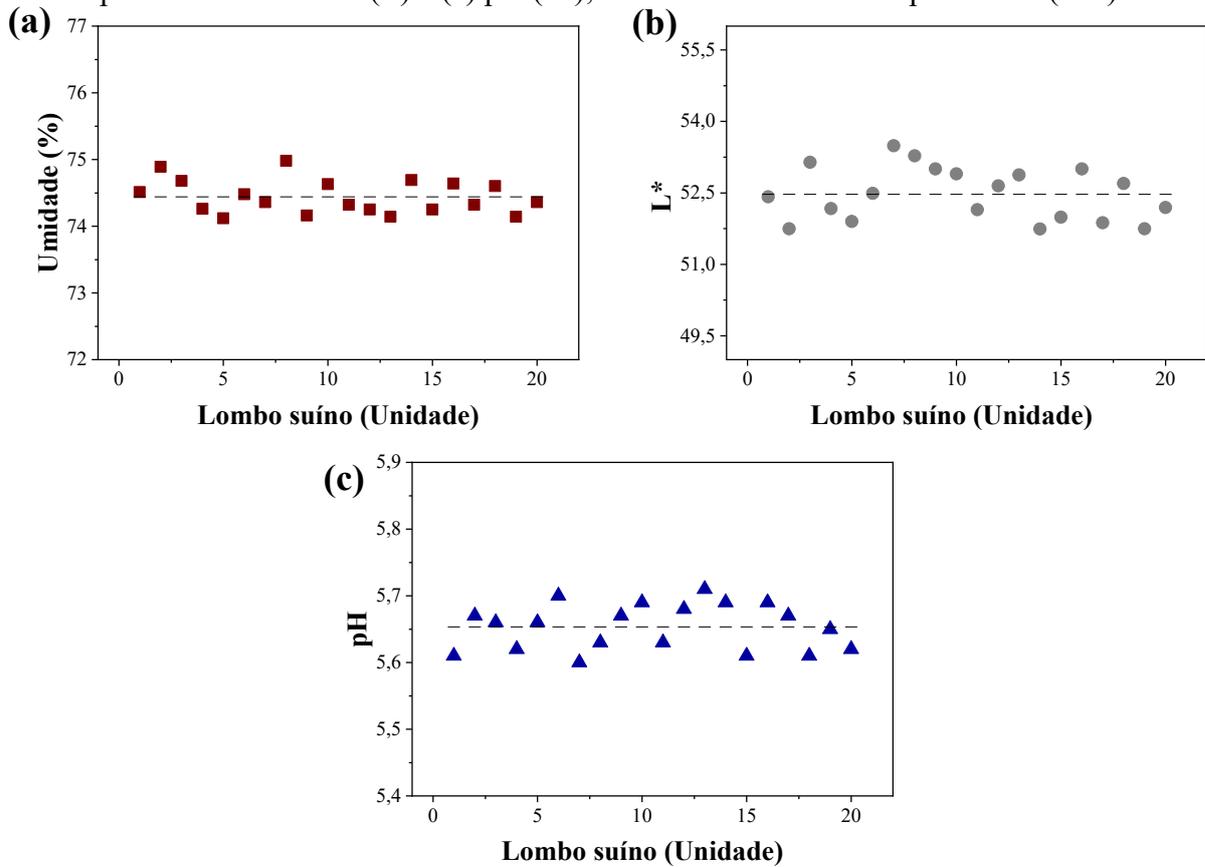
Onde Y^* é a evolução do parâmetro de cor (L^* , a^* ou b^*), Y_{∞}^* é a assíntota superior da curva (valor final de Y^*); Y_0^* é a assíntota inferior da curva (valor inicial de Y^*); k é a máxima taxa de aumento da função (inclinação de Hill) e T_C é o ponto de inflexão da curva.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Classificação da matéria-prima

A Figura 13 mostra os parâmetros de qualidade das peças lombo suíno utilizadas nos experimentos realizados. Esses parâmetros são a umidade, a luminosidade da superfície (L^*) e o pH do lombo suíno. Valores desses parâmetros fora do padrão podem resultar em CRA alterada, mascarando efeitos do assamento sobre os parâmetros de qualidade da carne assada (CHIAVARO et al., 2009). Os valores médios de umidade de $74,44 \pm 0,25$ % kg de água/kg de matéria úmida, L^* de $52,47 \pm 0,56$ e pH de $5,65 \pm 0,04$ foram encontrados para as amostras de lombo suíno. Os valores médios de L^* e pH estão dentro do padrão de lombo suíno normal com base de L^* no intervalo de 45 a 53 (MAGANHINI et al., 2007) e pH no intervalo de 5,6 a 5,9 (NPPC, 1999). Estes resultados foram semelhantes aos publicados para o mesmo músculo por outros autores (FRANCI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; POLAK et al., 2009). A relação de valores umidade / L^* / pH obtidos pelos autores foram $74,1$ % / $50,5$ / $5,62$ (CHIAVARO et al., 2009), $73,92$ % / $51,56$ / $5,67$ (FRANCI et al., 2005) e $74,66$ % / $52,8$ / $5,51$ (POLAK et al., 2009).

Figura 13 - Classificação de unidades de lombo suíno baseada em: (a) umidade (b.u) (■); (b) parâmetro de cor L* (●) e (c) pH (▲); valores médios de cada parâmetro (- - -).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

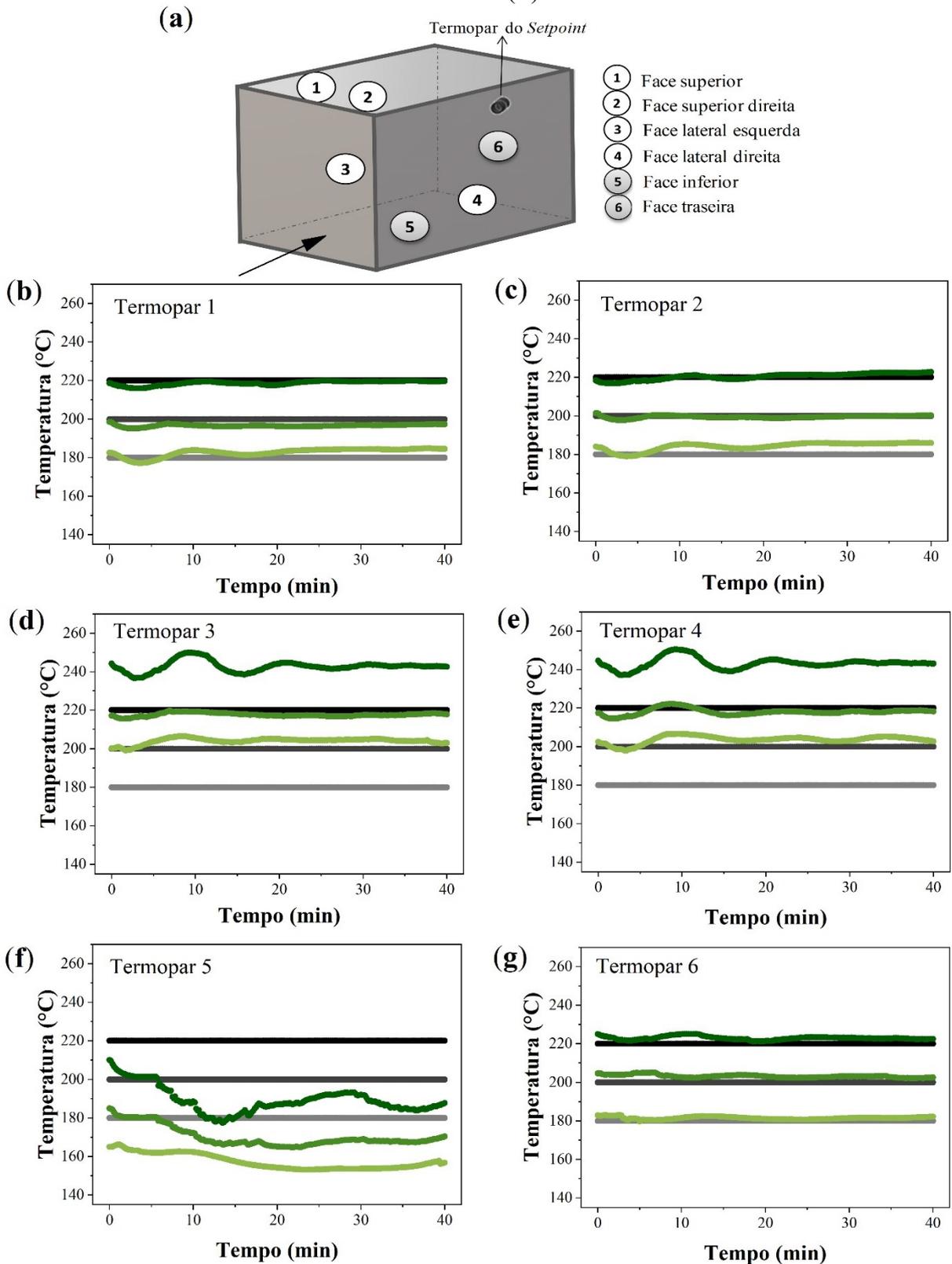
3.3.2 Validação da temperatura na cavidade do forno

A Figura 14 ilustra, com dados de temperaturas, a capacidade do controlador em manter as temperaturas constantes em diferentes posições do forno (Figura 14a) durante o assamento de lombo suíno nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C. O perfil de temperatura medido por cada termopar na cavidade foi semelhante e proporcional à temperatura de *Setpoint* selecionada. Os termopares correspondentes às faces superiores (Figuras 14b e 14c) se mantiveram próximos às temperaturas de *Setpoint* do forno. Os termopares 1 e 2, e, 3 e 4 foram alocados de forma simétrica na cavidade e apresentaram perfis semelhantes, como observado nas Figuras 14b e 14c, e nas Figuras 14d e 14e. Este resultado garante que o forno aqueceu e forneceu calor à amostra de maneira controlada e simétrica. Em um estudo anterior, foi constatado que a temperatura do forno entra em estado estacionário a partir de 60 min de aquecimento (SILVA, 2020). A partir disso, quando a cavidade é aberta para alocar a amostra no interior, um breve resfriamento é detectado na evolução da temperatura em todos os

termopares conectados à cavidade. Este resfriamento é ocasionado pela perda de calor para o ambiente e, em menor grau, pela inserção da amostra (~ 20 °C). No entanto, para compensar o resfriamento, o controlador atua nas resistências localizadas nas laterais do forno e produz calor para reaquecer a cavidade e manter a temperatura constante até o fim do assamento da amostra (Figura 14d e 14e). Por meio da avaliação dos perfis de temperatura na cavidade, foi observado que as laterais do forno apresentaram as temperaturas mais elevadas, mantendo-se em aproximadamente 20 °C acima do *setpoint* do controlador. Este fato foi observado em trabalho anterior e se deve à maior proximidade dos termopares 3 e 4 às resistências laterais do forno (SILVA, 2020).

A face inferior do forno ilustrada pela Figura 14f apresentou a maior oscilação durante o assamento. A temperatura inicial ficou abaixo da temperatura de *setpoint* e diminuiu ainda mais ao longo do assamento do lombo suíno. Como os perfis de temperatura foram obtidos assando lombo suíno suspenso em fios metálicos, perdas por gotejamento da carne foram coletadas no fundo do forno, em um recipiente de folha de alumínio. Este possível fator de perturbação foi analisado, mas concluiu-se que a carga térmica do gotejamento é muito pequena para manter a temperatura abaixo do *setpoint*. O experimento pode ter favorecido o resfriamento oscilatório detectado pelo termopar 5 no fundo do forno. Como o aquecimento é lateral, a convecção natural colabora pouco para aquecer a parede inferior (MISTRY et al., 2006). A face traseira do forno (Figura 14g) foi monitorada pelo Termopar 6, alocado convenientemente perto do termopar usado pelo controlador para manter a temperatura (*setpoint*). Os perfis de temperatura da Figura 14g mostram que a temperatura da parede do fundo ficou muito próxima do *setpoint* durante todo o período de assamento de lombo suíno. Assim, as temperaturas médias coletadas pelo termopar 6 foram $181,46 \pm 2,54$, $203,52 \pm 1,92$ e $222,97 \pm 2,49$, respectivamente, para os *setpoint* de 180, 200 e 220 °C.

Figura 14 - Validação das temperaturas da cavidade do forno durante o assamento: (a) Posição de termopares na cavidade do forno; (b) Termopar 1 (Parede superior esquerda); (c) Termopar 2 (Parede superior direita); (d) Termopar 3 (Parede lateral esquerda); (e) Termopar 4 (Parede lateral direita); (f) Termopar 5 (Parede inferior); (g) Termopar 6 (Parede traseira) nas temperaturas de 180 (●), 200 (●) e 220 °C (●). *Setpoint* do controlador a 180 (●), 200 (●) e 220 °C (●).

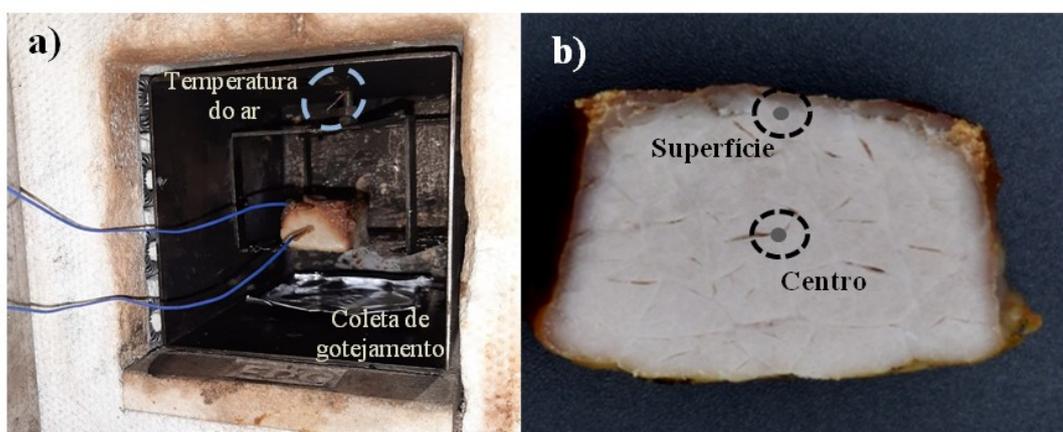


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3.3 Perfis de temperatura no lombo suíno durante o assamento

A fotografia da Figura 15a mostra a cavidade do forno, com a amostra suspensa e com os dois termopares inseridos, enquanto a Figura 15b mostra as posições onde os termopares foram inseridos.

Figura 15 - Posição dos termopares na amostra assada: (a) Configuração experimental e (b) Localização dos termopares.

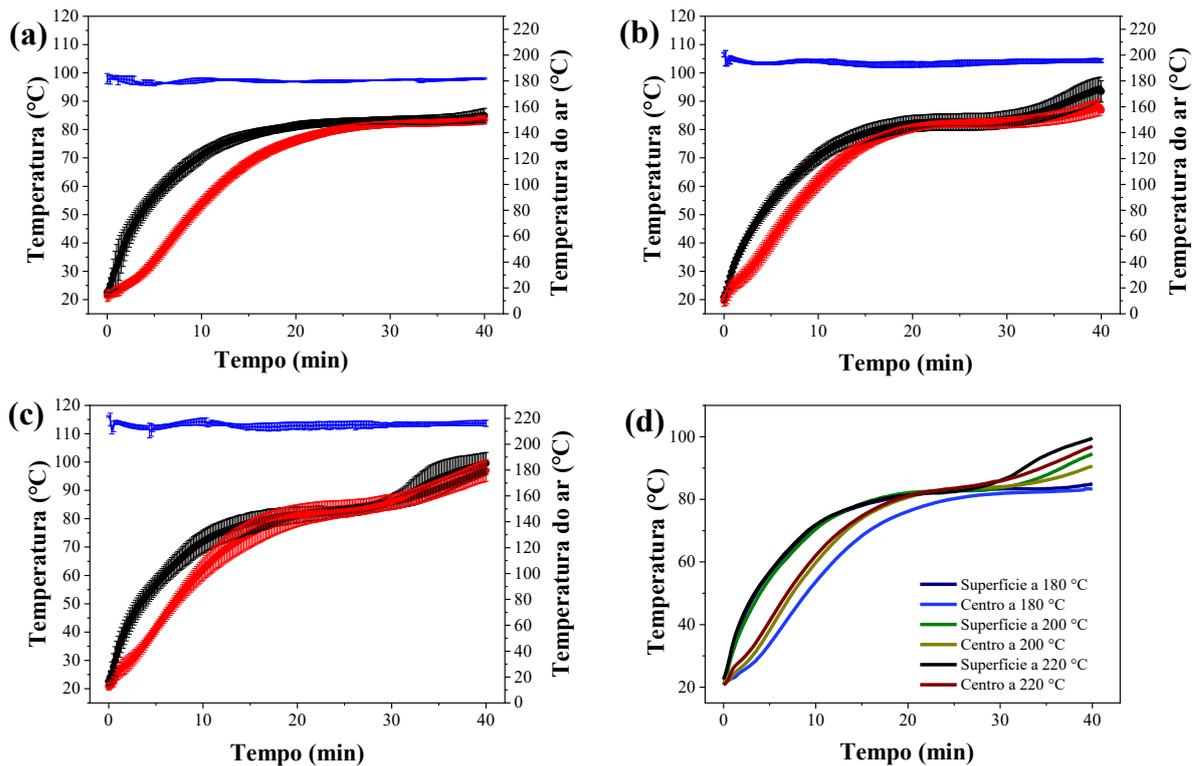


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Figura 16 mostra os perfis de temperatura registrados durante os experimentos de assamento nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Pode ser observado que a temperatura do ar no forno foi controlada automaticamente com uma precisão de ± 5 °C. As Figuras 16a, 16b e 16c mostram a evolução temporal da temperatura da superfície e do centro nas amostras de lombo suíno assadas a 180, 200 e 220 °C, respectivamente. No início do assamento, em todos os casos, a temperatura mais baixa correspondeu ao centro e a mais alta à superfície. Contudo, na etapa intermediária, o aumento da temperatura da superfície desacelera pelo resfriamento temporário ocasionado pela transferência de massa. O líquido migra do interior da carne e se acumula na superfície que fica suficientemente úmida até que ocorra a sua evaporação, limitando o aumento da temperatura. Além disso, a frente evaporativa impede temporariamente a formação de uma crosta. No final do processo de assamento, a temperatura da superfície volta a ser superior em relação à temperatura do centro. Este fato pode ser observado na Figura 16d, sendo favorecido pelo aumento da temperatura e tempo de assamento. Ainda, a etapa intermediária é dependente da temperatura de assamento, indicando que em temperaturas

maiores, a frente evaporativa superficial é mais curta quando comparada a 180 °C, que em 40 min não demonstra aumento significativo de temperatura superficial em comparação com a temperatura do centro.

Figura 16 - Perfis de temperatura na superfície da amostra (●), no centro da amostra (●) e temperatura do ar (eixo direito) dentro do forno (●) durante o assamento de lombo suíno a: (a) 180 °C; (b) 200 °C; (c) 220 °C e (d) comparação dos perfis de temperatura representativos.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Tabela 2 resume informações importantes para melhor caracterizar os perfis de temperatura obtidos no assamento de lombo suíno. Ambos os conjuntos de curvas apresentaram baixos coeficientes de variação, sendo considerados homogêneos. Portanto, a Figura 16d representa o comportamento geral dos perfis de temperatura em cada posição do termopar na amostra, para cada temperatura de assamento. É importante apontar que as pequenas variações observadas nos dados experimentais são ocasionadas pela dificuldade de alocar um termopar exatamente na superfície e centro da amostra de lombo suíno crua e também pela alteração de volume durante o processo de assamento.

A taxa de aquecimento máxima foi identificada nos primeiros minutos do processo de assamento, com valores de $10,56 \pm 1,33 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ na superfície da amostra, para as três temperaturas. No centro, as taxas de aquecimento máximas foram menores do que na superfície

e aumentaram com o aumento da temperatura de assamento (Tabela 2). No decorrer do processo, as taxas de aquecimento diminuíram e a temperatura se aproximou da temperatura do ar no interior do forno. A temperatura de 75 °C no centro da carne é recomendada para cozimento de carne suína pelo grau de cozimento (OCDE/FAO, 2019). No presente estudo, o tempo necessário para a temperatura no centro da carne atingir 75 °C foi menor com o aumento da temperatura do forno, confirmando o esperado. Quanto às temperaturas finais nas amostras, estas aumentaram com o aumento da temperatura de assamento e a temperatura final da superfície se manteve superior à temperatura final do centro em todas as condições de assamento, o que também se espera com base em conhecimentos de processos de transferência de calor. Outros pesquisadores encontraram comportamento semelhante durante o assamento de carne (VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; GOÑI; SALVADORI, 2010; FEYISSA, 2011). Taxas de aquecimento máximas da literatura foram coletadas graficamente de perfis de temperaturas durante o assamento de lombo suíno. Vittadini et al. (2005) obteve uma taxa de aquecimento máxima de 7,08 e 3,51 (°C·min⁻¹) na superfície e centro da amostra, respectivamente, em forno convencional a 180 °C. Por outro lado, em forno com circulação de ar a 175 °C, Feyissa et al. (2013) teve taxa máxima de aquecimento de 11,23 e 4,67 (°C·min⁻¹) na superfície e centro da amostra, respectivamente.

Tabela 2 - Descrição das características dos perfis de temperatura obtidos no assamento de lombo suíno.

	Temperatura de assamento (°C)		
	180	200	220
Coeficiente de Variação do conjunto de curva (%)	5,64*	5,00*	7,32*
	4,10**	4,53**	6,52**
Taxa de aquecimento máxima (°C·min ⁻¹)	9,01 ± 2,55 ^{Aa*}	10,92 ± 1,72 ^{Aa*}	11,82 ± 2,68 ^{Aa*}
	3,36 ± 0,24 ^{Ab**}	4,07 ± 0,13 ^{Bb**}	4,26 ± 0,38 ^{Bb**}
Tempo para atingir 75 °C no centro (min)	19,29 ± 1,11 ^A	15,66 ± 0,60 ^B	14,92 ± 1,94 ^B
Temperatura central final (°C)	83,36 ± 1,17 ^{Aa}	86,79 ± 1,10 ^{Aa}	95,26 ± 3,67 ^{Ba}
Temperatura da superfície final (°C)	85,01 ± 2,18 ^{Aa}	93,48 ± 4,36 ^{Bb}	100,72 ± 2,93 ^{Ca}

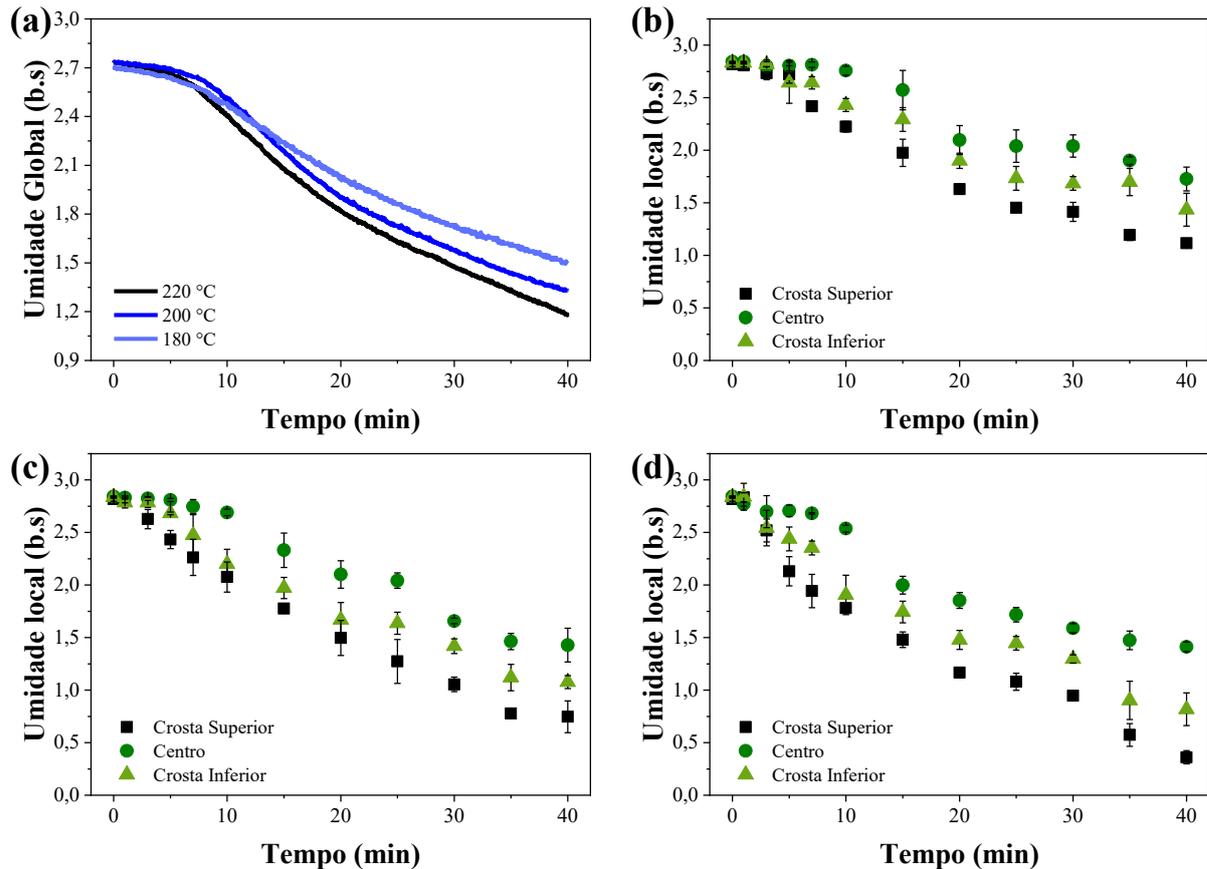
(*) Superfície e (**) Centro da amostra. ^AMédias com letras maiúsculas sobrescritas distintas na mesma linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre as temperaturas de assamento pelo teste de Tukey. ^aMédias com letras minúsculas sobrescritas distintas na mesma coluna (taxas de aquecimento máximas ou temperaturas locais) indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre centro e superfície da amostra pelo teste de Tukey. Fonte:

Elaborado pela autora (2022).

3.3.4 Variação de massa

A Figura 17 mostra a variação de massa global e local durante o assamento de lombo suíno. A Figura 17a mostra os perfis de umidade global durante o assamento do lombo a diferentes temperaturas, enquanto as Figuras 17b, 17c e 17d mostram as umidades locais (crosta superior, centro e crosta inferior) das amostras assadas a 180, 200 e 220 °C, respectivamente.

Figura 17 - (a) Perfis de umidade global em diferentes temperaturas; Umidades locais a (b) 180 °C, (c) 200 °C e (d) 220 °C durante assamento de lombo suíno.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

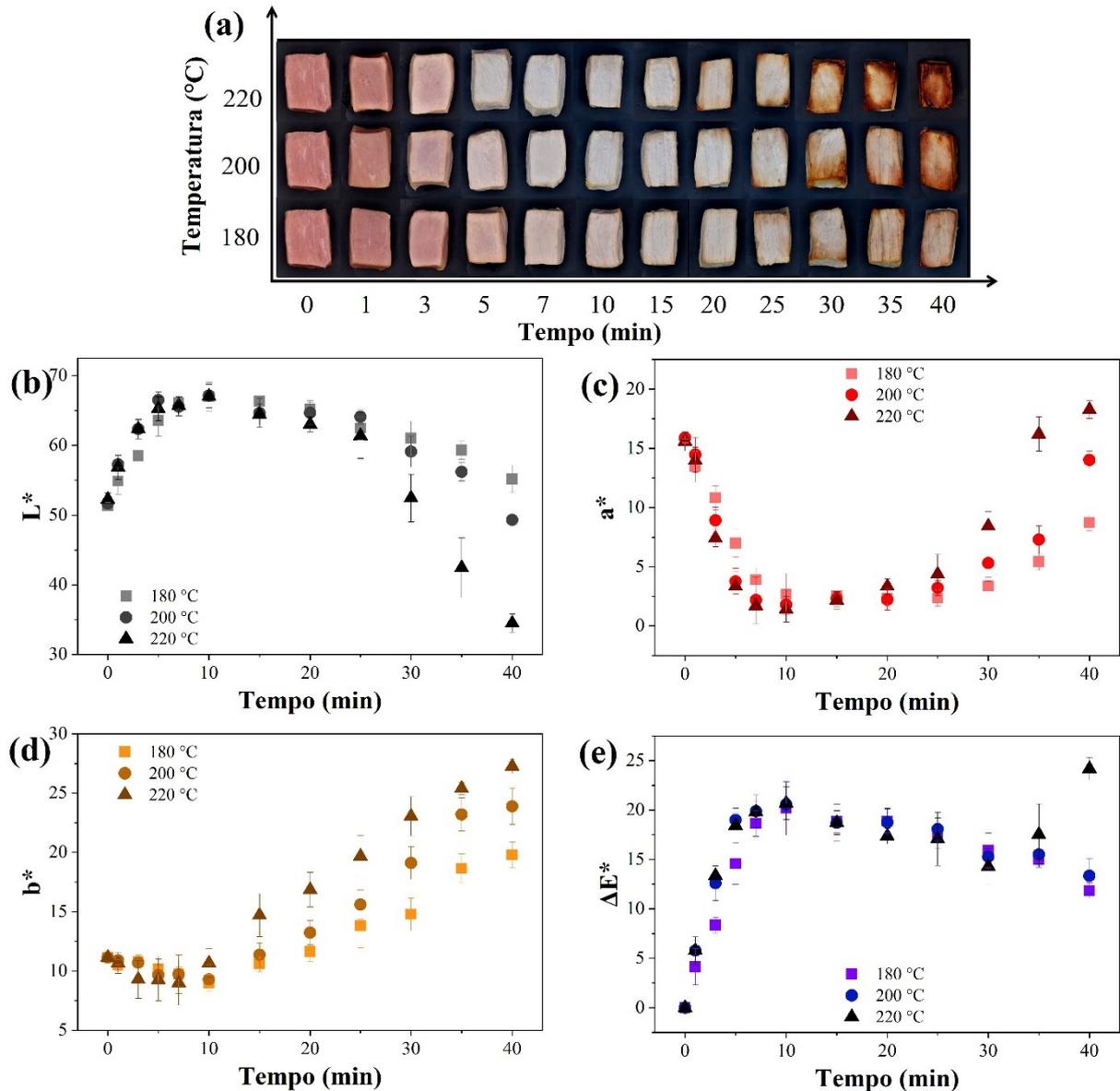
Como esperado, a umidade global das amostras diminuiu com o aumento da temperatura de assamento, pois maiores temperaturas implicam em maior transferência de calor para a amostra, aumentando a taxa de evaporação. No final do processo, as umidades globais foram $1,50 \pm 0,06$, $1,33 \pm 0,03$ e $1,18 \pm 0,05$ kg água·kg sólidos secos⁻¹ para 180, 200 e 220 °C, respectivamente. Quanto às umidades locais, observou-se uma semelhança no comportamento dos perfis obtidos nas temperaturas de assamento avaliadas. Assim como a umidade global, as umidades locais diminuíram com o aumento da temperatura de assamento. As maiores umidades locais foram identificadas no centro da amostra, seguidas da crosta inferior e da crosta superior. Resultados semelhantes de umidade local em lombo suíno foram publicados por

Feyissa et al. (2009), que mostraram que umidade local aumenta em direção ao centro e diminui com o aumento do tempo de assamento. Feyissa et al. (2013) estudaram a transferência da água na carne durante o assamento. Eles observaram um fluxo de água em direção à superfície, contra o gradiente de temperatura. Durante o todo o processo de assamento, a crosta inferior mantém-se com umidade superior à crosta superior, o que é justificado pela presença de água oriunda de gotejamento que escorre nas laterais da amostra e fica retida na parte inferior, reduzindo a saída de vapor e contribuindo para maior umidade local.

3.3.5 Mudanças de Cor

A Figura 18 mostra as mudanças nos parâmetros de cor da amostra durante o assamento e ilustra as mudanças de cor com uma sequência de fotografias do corte de lombo suíno assado a 180, 200 e 220 °C. A cor superficial evoluiu de vermelho para o marrom dourado característico de carne assada com o decorrer do assamento, e a taxa de escurecimento aumentou com o aumento da temperatura. As laterais da amostra tendem a ser as primeiras a mudarem de cor, por serem as regiões mais afetadas pelas condições do processo de assamento. As Figuras 18b, 18c e 18d mostram os perfis isotérmicos dos parâmetros L^* , a^* e b^* de amostras de lombo suíno assadas a 180, 200 e 220 °C, respectivamente. A Figura 18e ilustra a evolução total da cor da amostra no assamento em função da temperatura.

Figura 18 - Cor superficial de lombo suíno durante o assamento a 180, 200 e 220 °C: (a) sequência de fotografias registradas em diferentes tempos de assamento; (b) L* (preto para branco); (c) a* (verde para vermelho); (d) parâmetro b* (azul para amarelo) e evolução total da cor total da cor (ΔE^*).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No início do processo de assamento, as amostras são vermelhas em tom característico de carne suína. Após os primeiros minutos de assamento, as superfícies evoluem para tons mais claros, passando por rosa e acinzentado. A mudança de cor inicial do lombo suíno do rosado para acinzentado é relacionado à desnaturação térmica de proteínas heme, como a mioglobina e a hemoglobina (CHIAVARO et al., 2009). Estas proteínas desnaturam em torno de 65 a 80 °C e expõem o grupamento heme, liberando oxigênio responsável pelo precipitado marrom

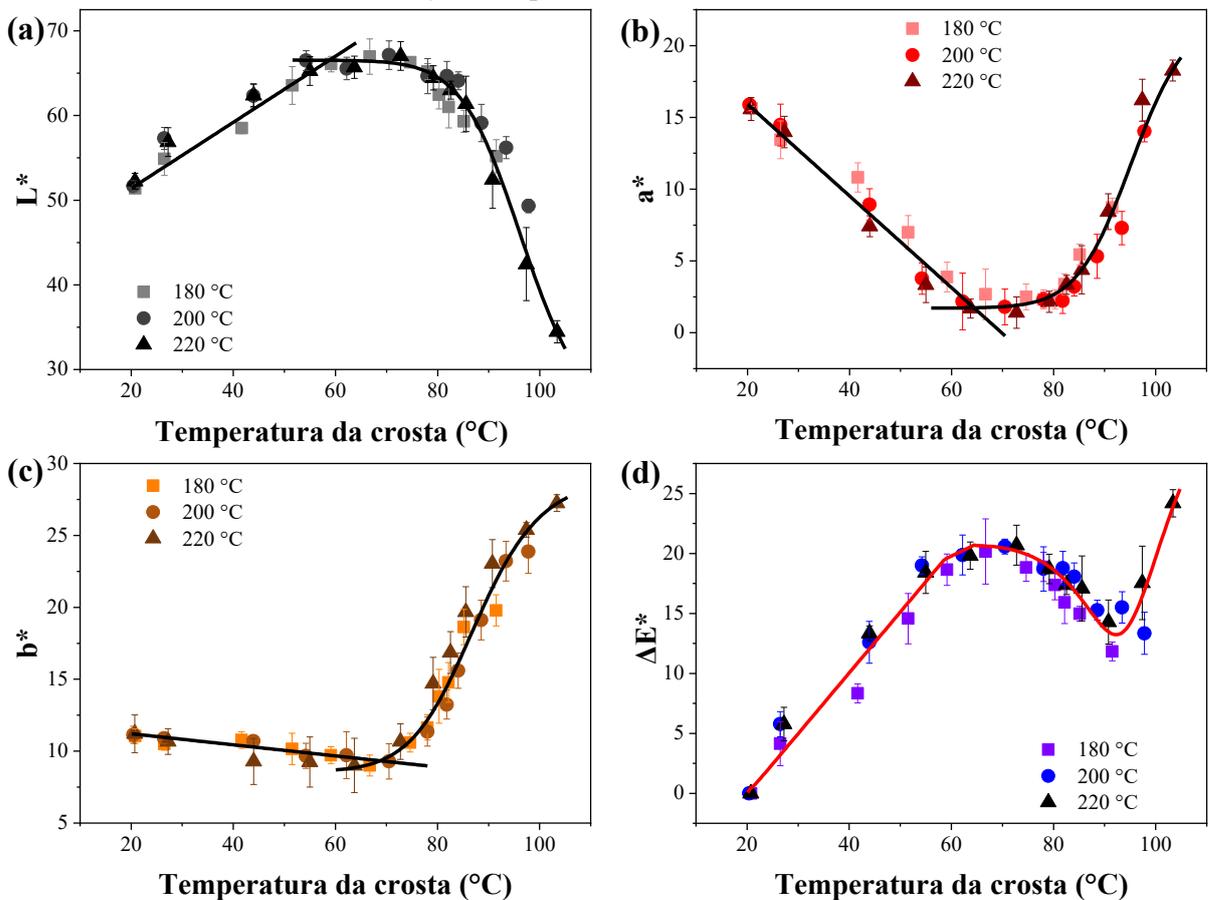
acinzentado durante o cozimento (MARTENS; STABURSVIK; MARTENS, 1982; LAWRIE; LEDWARD, 2006; FELLOWS, 2016). A umidade acumulada na superfície da carne (favorecida pelo fluxo de água para a superfície) inibe o avanço da RM e conseqüentemente a formação de compostos de escurecimento, mantendo L^* mais altos e a^* mais baixos (WANG et al., 2019). Dessa forma, além da vermelhidão (a^*), a luminosidade (L^*) explica e contribui muito para a evolução da cor de lombo suíno assado. Em especial, a maior contribuição para a evolução total de cor (ΔE^*) é fornecida pelo parâmetro L^* e não pelo parâmetro a^* . Este fato também foi observado por outros autores (MOYA *et al.*, 2021; PAKULA; STAMMINGER, 2012). Altos níveis de luminosidade são relacionados às alterações estruturais pela perda de água durante o cozimento, como a redução do diâmetro da fibra muscular, encolhimento miofibrilar e encurtamento do sarcômero (PALKA; DAUN, 1999; STRAADT et al., 2007). Estas mudanças estruturais influenciam a extensão do espaçamento miofibrilar, como a perda de cozimento e encolhimento de fibras dentro da carne ocasionados pela desnaturação térmica (HUGHES et al., 2014). Dessa forma, a temperatura e umidade da crosta influenciam diretamente a evolução da cor superficial de lombo suíno assado porque modificam a dispersão da luz.

Na fase intermediária do assamento, a superfície da carne começa a secar, criando condições para o início das reações de escurecimento, o que leva a um aumento de a^* e b^* , e redução de L^* . Este fato pode ser observado a partir de 10 min de assamento. A RM ocorreu gradualmente, acumulando melanoidinas nas superfícies e os valores a^* e b^* aumentaram de forma contínua com o tempo e temperatura de cozimento (VITTADINI et al., 2005; WANG et al., 2019). Assim, os valores de L^* aumentaram durante o período inicial e depois diminuíram para valores ainda mais baixos que o inicial. Dessa forma, o aumento da temperatura superficial tende a favorecer a RM que promove a mudança de acinzentado para marrom característico de carne assada. Finalmente, quando a temperatura da superfície está próxima de 100 °C, ocorrem reações de carbonização, que resultam em maior escurecimento da amostra. Este fato pode ser observado após 35 min a 220 °C. Tendências semelhantes foram relatadas para carne de frango assada (RABELER; SKYTTE; FEYISSA, 2019), lombo suíno assado em forno convencional e com injeção de vapor (WANG et al., 2019) e lombo bovino cozido em panela dupla face (MOYA *et al.*, 2021).

A Figura 19 mostra a evolução dos parâmetros de cor L^* , a^* , b^* e ΔE^* em função da temperatura da crosta, independente do *setpoint* do controlador. Pode-se observar que inicialmente os parâmetros apresentaram comportamento semelhante às respectivas cinéticas ilustradas na Figura 19. O perfil de L^* (preto/branco) em função da temperatura de crosta

apresenta um aumento linear no intervalo de 20 a 60 °C. Por outro lado, o perfil de a^* (vermelho/verde) e b^* (amarelo/azul) apresentaram uma diminuição linear no mesmo intervalo de temperatura. Quando a crosta atinge aproximadamente 60 °C os perfis de L^* , a^* e b^* mudam, intensificando a evolução dos parâmetros de cor e modelos sigmóides podem ser ajustados aos dados.

Figura 19 - Relação entre a temperatura da crosta (°C) e (a) parâmetro L^* ; (b) parâmetro a^* e (c) parâmetro b^* e (d) evolução total da cor (ΔE^*); (-) Modelo ajustado e (-) relação em função dos parâmetros L^* , a^* e b^* .



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de ajuste dos modelos aos dados de L^* , a^* e b^* em função de temperatura de superfície. Os modelos representaram bem a evolução dos parâmetros de cor dentro dos respectivos intervalos de temperatura. Todos os modelos apresentaram um fator de determinação (R^2) acima de 0,96 e RMSE máximo de 1,34 indicando boa correlação e ajuste matemático com os dados experimentais.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos ajustados aos parâmetros de cor (Y^*)(L^* , a^* e b^*) em função da temperatura (T_{Sup}) nas Figuras 19 e seus coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio ($RMSE$).

Y^*	Constantes do modelo			
	$Y^* = a + b \cdot T_{Sup}$			
	a	b	$RMSE$	R^2
L^*	43,69	0,39	1,34	0,96
a^*	22,32	-0,32	0,90	0,98
b^*	11,93	-0,04	0,23	0,95

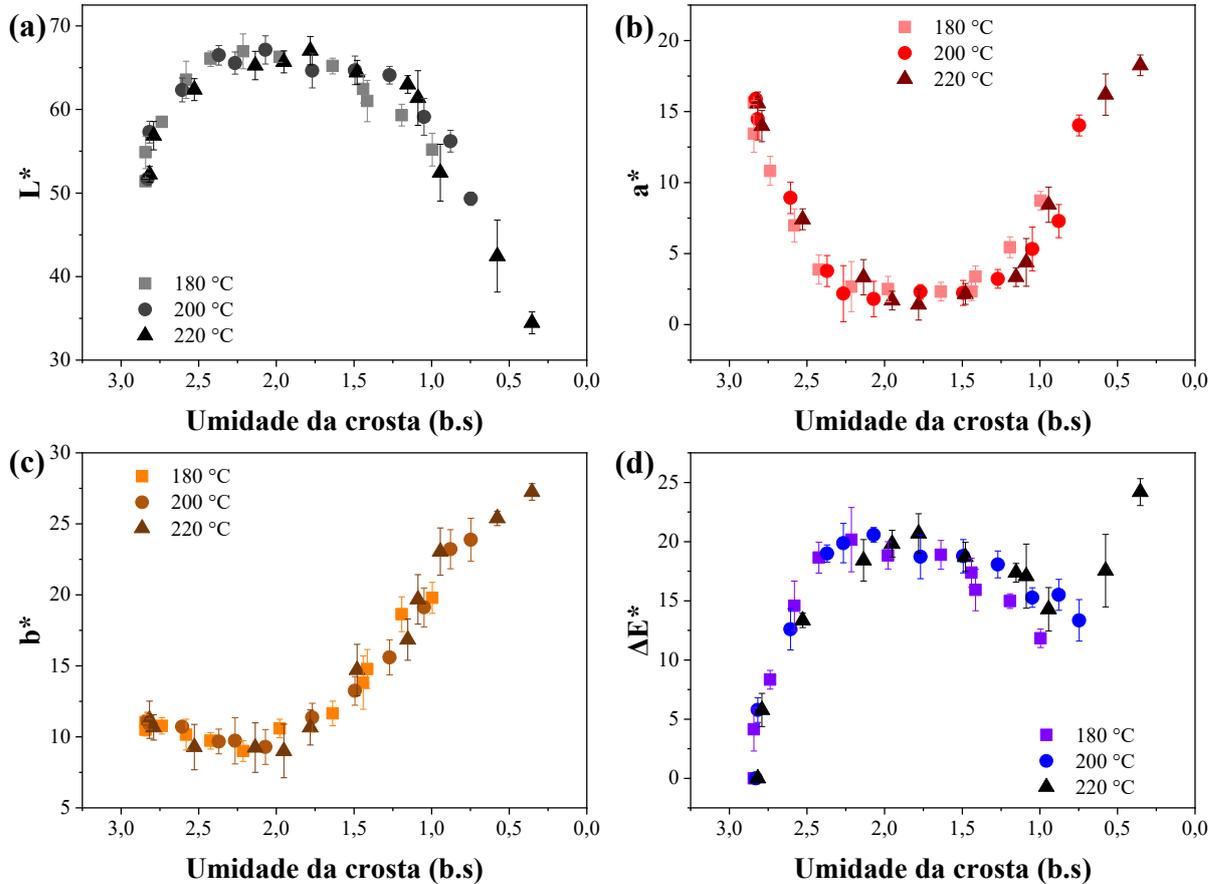
Y^*	$Y^* = Y_{\infty}^* + \frac{Y_o^* - Y_{\infty}^*}{1 + \left(\frac{T_{Sup}}{T_c}\right)^k}$					
	Y_{∞}^*	Y_o^*	T_c	k	$RMSE$	R^2
L^*	22,85	66,57	96,90	15,74	0,84	0,98
a^*	22,77	1,67	95,69	17,10	0,89	0,98
b^*	29,13	8,53	87,52	13,49	0,91	0,98

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os perfis de evolução dos parâmetros de cor de lombo suíno assado em função de temperatura foram devidamente representados matematicamente. Quanto à taxa de escurecimento (k) dos parâmetros de cor, b^* evoluiu de forma mais suave em função de temperatura, uma vez que apresentou a menor taxa máxima de escurecimento (13,49), seguido do parâmetro L^* (15,74). Em contrapartida, a maior taxa de escurecimento observada ocorre no parâmetro a^* (17,10). Pelos pontos de inflexão (T_c) conclui-se que as taxas máximas de escurecimento dos parâmetros de cor ocorrem nos intervalos de temperaturas de 87,52 a 96,90 °C.

A Figura 20 mostra a evolução dos parâmetros de cor L^* , a^* , b^* e ΔE^* em função umidade da crosta, independente do *setpoint* do controlador. Comportamentos semelhantes foram obtidos em relação à temperatura da crosta (Figura 19) e as respectivas cinéticas ilustradas na Figura 18. Tal comportamento dos parâmetros de cor em função da umidade está relacionado ao fenômeno físico de formação da crosta e liberação de umidade, altamente dependente da temperatura da superfície. O perfil de L^* (preto/branco) em função da umidade de crosta apresenta aumento no intervalo de 2,82 a 2,22 $\text{kgH}_2\text{O} \cdot \text{kgss}^{-1}$. No mesmo intervalo de umidade, os valores de a^* (vermelho/verde) e b^* (amarelo/azul) diminuiram. Quando a crosta atinge umidade de aproximadamente 2,22 $\text{kgH}_2\text{O} \cdot \text{kgss}^{-1}$ os perfis de L^* e a^* mudam, intensificando a evolução dos parâmetros de cor até 0,36 $\text{kgH}_2\text{O} \cdot \text{kgss}^{-1}$.

Figura 20 - Relação entre a umidade da crosta (°C) e (a) parâmetro L*; (b) parâmetro a* e (c) parâmetro b* e (d) evolução total da cor (ΔE^*).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

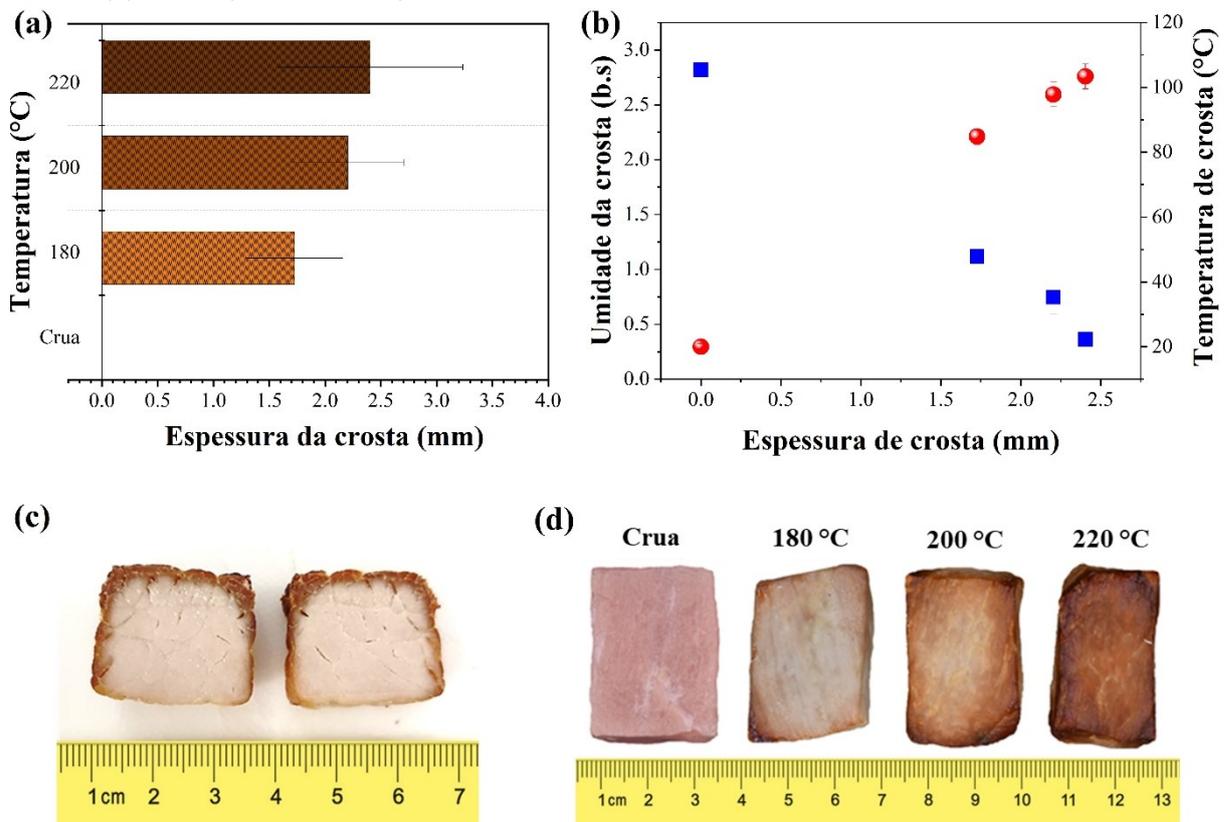
3.3.6 Formação de crosta

A Figura 21 ilustra a caracterização de formação de crosta de lombo suíno assado em função da temperatura. As espessuras médias de crosta de lombo suíno assado por 40 min a temperaturas de 180, 200 e 220 °C foram de $1,73 \pm 0,43$, $2,20 \pm 0,51$ e $2,40 \pm 0,83$ mm, respectivamente (Figura 21a). Pode-se afirmar que o aumento do tempo e da temperatura de assamento favorecem a formação de crosta em lombo suíno, assim como os fenômenos e as reações na superfície da carne. Além disso, a relação de formação de crosta com o aumento da temperatura e redução de umidade local é ilustrada na Figura 21b.

A crosta formada em lombo suíno foi caracterizada como uma estrutura complexa moldada pela contração de fibras musculares e fissuras heterogêneas entre os feixes de fibras musculares. Além disso, a formação de crosta não é homogênea em toda a superfície da carne, independente da temperatura de assamento (Figuras 21c e 21d), exigindo análises em diferentes regiões (Figura 21c). Este fato é justificado pela distribuição heterogênea de temperatura na

superfície da crosta. Segundo Llave et al 2014, este fato é agravado quando a carne tem baixo teor de gordura. Desta forma, diferentes estruturas podem ser formadas por reações químicas locais, dependendo da temperatura. Ainda, diferentes fases de carbonização foram observadas na superfície da crosta (LLAVE et al., 2014).

Figura 21 – Caracterização de formação de crosta de lombo suíno assado por 40 min (a) espessura em função da temperatura, (b) espessura em função da umidade (■) (eixo esquerdo) e temperatura da crosta (●) (eixo direito), (c) seção transversal de amostra assada a 220 °C e (d) ilustração da formação da crosta em carne crua e assada a 180, 200 e 220 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

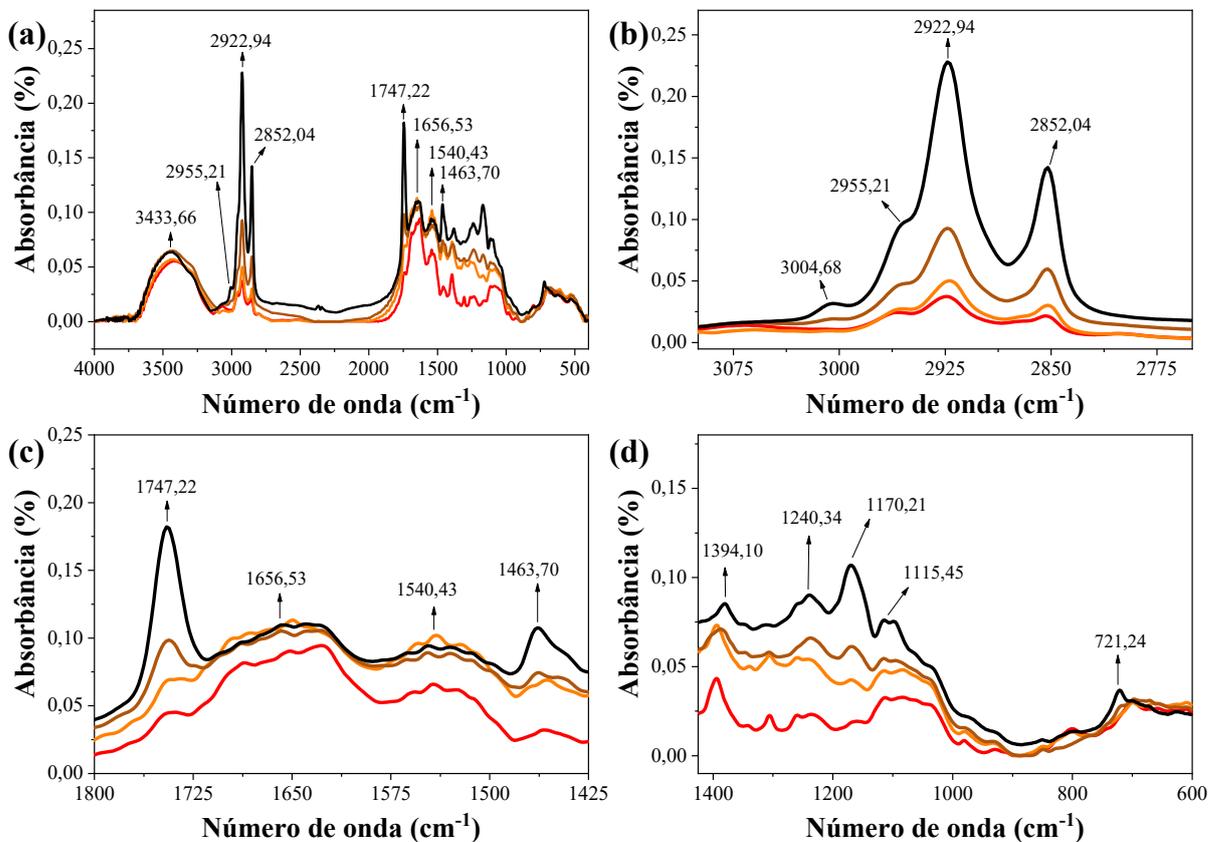
A crosta é caracterizada como uma camada porosa junto à superfície da carne, que tem sua espessura aumentada gradativamente durante o assamento. A formação de crosta é favorecida pela desnaturação de proteínas, liberação de água e consequente retração das proteínas na superfície da carne. A redução de umidade superficial forma uma camada seca porosa que envolve a carne (PORTANGUEN et al., 2014; KONDJAYAN et al., 2016). A caracterização da crosta em carne assada fornece informações valiosas para a compreensão da transferência de calor e massa dentro da carne, além das mudanças físico-químicas que ocorrem durante o assamento em diferentes condições. Sabe-se que a superfície da crosta é considerada a área de evaporação durante o assamento e sua temperatura é superior ao ponto de ebulição da

água (FEYISSA; GERNAEY; ADLER-NISSEN, 2013). Na interface que limita as áreas com e sem crosta está a frente de evaporação, e, as propriedades mecânicas da carne mudam conforme essa interface avança e a superfície da carne torna-se mais seca (PORTANGUEN et al., 2014).

3.3.7 FTIR de crosta de lombo suíno assado

A Figura 22 mostra o espectro de absorção FTIR representativo do efeito da temperatura de assamento sobre a crosta de lombo suíno. São representados os espectros de lombo suíno cru e assado à temperatura de 180, 200 e 220 °C. As bandas apresentaram aumento na intensidade da absorção após o processo de assamento. Dessa forma, pode-se afirmar que a evolução das reações de escurecimento simultaneamente por oxidação lipídica e reação de Maillard tem relação direta com a temperatura, umidade e espessura da crosta.

Figura 22 – Espectro de FTIR-ATR de crosta de lombo suíno (■) cru e assado por 40 min a (■) 180, (■) 200 e (■) 220 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A ampla banda de absorção em $3433,66\text{ cm}^{-1}$ ocorre devido à vibração de alongamento simétrico de hidroxilas (OH) e aminas (NH) de álcoois e amida/proteínas, respectivamente (Figura 22a). Na Figura 22b (região de IV de $3100\text{-}2750\text{ cm}^{-1}$) o sinal de baixa intensidade em 3006 cm^{-1} está associado com a vibração da ligação CH dos ácidos graxos insaturados com ligação dupla *cis* ($\text{C} = \text{CH}$) (ROHMAN et al., 2011). Ainda, a intensa banda de absorção em $2955,21\text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de alongamento assimétrico dos grupos metil (CH_3), enquanto as bandas de vibração em $2922,94$ e $2852,04\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas ao alongamento simétrico e assimétrico de metileno (CH_2), respectivamente. Em $1463,70\text{ cm}^{-1}$ também foi observada a vibração de flexão de CH_2 (Figura 22c). As vibrações de alongamento CH_3 e CH_2 são geralmente atribuídas aos lipídios (DUMAS; MILLER, 2003; STUART, 2004; CALABRÒ; MAGAZÙ, 2020).

A absorbância das bandas de vibração de CH_2 foram intensificadas com o aumento da temperatura de assamento e podem ser atribuídas ao aumento lipídico devido à reação de Maillard e oxidação lipídica, comprovando que as reações ocorreram e devem ter correlação positiva com a temperatura utilizada para o assamento (Figura 22b e 22c). Este fato pode ser observado avaliando o espectro correspondente à carne crua em comparação aos espectros de crosta de lombo suíno assado. O aumento da intensidade das vibrações foi observado anteriormente quando se avaliou o efeito do tratamento térmico em carne bovina moída pelo micro-ondas e forno convencional (CALABRÒ; MAGAZÙ, 2014).

Outra mudança relevante na região IV de 1800 a 1425 cm^{-1} (Figura 22c) foi observada em $1747,22\text{ cm}^{-1}$, onde uma banda intensa pode ser observada no espectro de crosta de lombo suíno com o aumento da temperatura de assamento. Esta banda pode ser atribuída ao alongamento do grupo carbonila ($\text{C} = \text{O}$) da ligação éster dos triglicerídeos (HODGE, 1953). O aumento da intensidade desta banda é relevante e pode ser atribuído às reações de escurecimento citadas anteriormente. A reação de Maillard é favorecida com o aumento da temperatura e segue formando compostos intermediários iniciais, incluindo os produtos de Amadori e Heyn, entre os quais se encontram compostos CH_2 e $\text{C} = \text{O}$ (HODGE, 1953; NAMIKI, 1988). Isto explica a presença relevante de suas bandas de vibração nos espectros de amostras de crosta de lombo suíno com o aumento da temperatura de assamento.

As bandas de absorção de CH_3 , CH_2 , $\text{C} = \text{O}$ e $\text{C} - \text{O}$ e foram observadas em espectros de FTIR de compostos intermediários heterocíclicos como o hidroximetilfurfural e o furfural de alta pureza, além de suas respectivas melanoidinas formadas em sistemas de modelo aquoso. Estas bandas são características de melanoidinas indicando a presença de funções carbonílicas. Diante de espectros de FTIR de melanoidinas isoladas de café e de malte torrados é possível

associar de um modo nítido as melanoidinas de alimentos às bandas de absorção em CH_3 , CH_2 , $\text{C} = \text{O}$ e $\text{C} - \text{O}$ (MOHSIN et al., 2019).

As alterações nas regiões de amida I e amida II após o assamento são apresentadas na Figura 22c. Os espectros exibiram bandas intensas de amida I e II, centradas em $1656,53 \text{ cm}^{-1}$ ($1700\text{-}1600 \text{ cm}^{-1}$) e $1540,43 \text{ cm}^{-1}$ ($1560\text{-}1500 \text{ cm}^{-1}$), respectivamente. Essas bandas estão relacionadas ao teor de proteína na carne (YU, 2005). A região da amida I é sensível à conformação da proteína e é comumente usada para analisar sua estrutura secundária (LIN et al., 2015). Na região da amida I foram identificadas as bandas $1694,68$, $1685,15$, $1656,53$ e $1635,65 \text{ cm}^{-1}$. A banda $1656,53 \text{ cm}^{-1}$ corresponde principalmente ao conteúdo estrutural α -hélice devido a uma vibração de estiramento $\text{C} = \text{O}$ e um modo de flexão $\text{N} - \text{H}$ (CALABRÒ; MAGAZÙ, 2014). As bandas de absorção de $1694,68$ e $1635,25 \text{ cm}^{-1}$ são atribuídas a estrutura da folha β . A banda $1685,15 \text{ cm}^{-1}$ está relacionada com mudança nas estruturas de folhas β antiparalelas intramoleculares em amostras aquecidas (OVISSIPOUR et al., 2017). Ainda, as bandas $1694,68$ e $1685,15 \text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídas a voltas β , características de processos desordenados da proteína (CALABRÒ; MAGAZÙ, 2020). A banda $1635,25 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuída às mudanças nas estruturas da folha β , indicando agregação de proteínas (CARTON et al., 2009; OVISSIPOUR et al., 2017). A intensidade da absorção das bandas aumentou após o processo de assamento, indicando agregação de proteínas na crosta de lombo suíno assado. Isso é relacionado ao maior teor em estruturas de folhas β agregadas (CALABRÒ; MAGAZÙ, 2014; OVISSIPOUR et al., 2017).

A desnaturação e as mudanças de conformação estrutural das proteínas durante o tratamento térmico estão intimamente relacionadas com a digestibilidade. A eficácia nutritiva, o comportamento digestivo e a utilização das proteínas podem ser influenciadas por suas relações α -hélice e folhas β na estrutura secundária, como uma alta proporção folhas β para α -hélice induzem um baixo acesso às enzimas digestivas gastrointestinais, resultando em um baixo valor proteico e disponibilidade (YU, 2005; KONG; YU, 2007; CALABRÒ; MAGAZÙ, 2014). O aquecimento tende a aumentar o desenrolamento das proteínas e, em seguida, maximizam a exposição da superfície da proteína às zonas hidrofóbicas e, assim, promover a acessibilidade das enzimas digestivas aos locais de clivagem. No entanto, altas temperaturas durante o cozimento podem resultar na redução de acessibilidade das proteases digestivas aos locais de clivagem na proteína. Este fato é justificado devido à reconstrução da estrutura das proteínas, especialmente a agregação de proteínas (ZHOU et al., 2018, 2019) e, em seguida diminuindo o sítio ativo para proteases.

A banda de amida II ($1540,43\text{ cm}^{-1}$) de menor intensidade de absorção é associada à vibrações combinadas de flexão de ligação NH e alongamento CN de proteínas (ROHMAN et al., 2011; CALABRÒ; MAGAZÙ, 2014). Na Figura 22d a banda $1394,10$ corresponde ao grupo CH_3 em proteínas (amida I) e lipídios e pode ser usada como marcador de mudanças na estrutura da proteína (SAZONOVA et al., 2019). Fosfolipídios e ácidos nucleicos são caracterizados por vibrações de alongamento assimétrico (não ligado a H) de grupos PO_2^- em $1240,34\text{ cm}^{-1}$. Por outro lado, a banda $1240,34\text{ cm}^{-1}$ pode ser associada à vibração de alongamento de C – O (MOHSIN et al., 2019). A banda $1170,21$ é atribuída ao alongamento de grupos CO e C – OH de resíduos de aminoácidos como serina, treonina e tirosina (DENIZ et al., 2018). A banda $1115,45$ é atribuída as vibrações de flexão e deformação de grupamentos CH de ácidos graxos (ROHMAN et al., 2011) ou ainda associada ao alongamento simétrico do grupo P – O – C de ácidos nucleicos (DENIZ et al., 2018). Por fim, a sobreposição da vibração de oscilação de CH_2 e à vibração fora do plano de olefinas *cis* –dissubstituídas são identificadas na banda $721,24\text{ cm}^{-1}$ (ROHMAN et al., 2011).

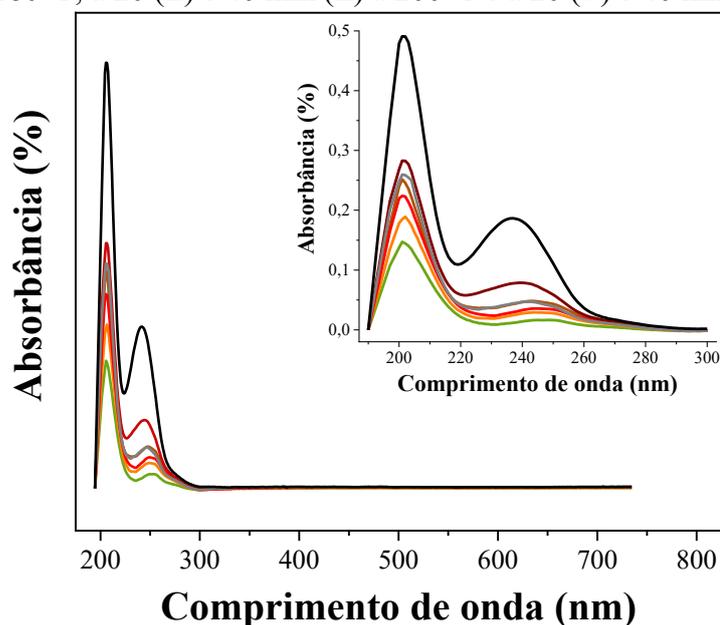
3.3.8 Análise de extrato de pigmento marrom de lombo suíno assado

Para investigar o pigmento marrom extraído foram realizadas análises espectrais UV-Vis e FTIR na tentativa de identificar características estruturais e componentes por meio da teoria envolvida.

3.3.8.1 Ensaio de UV-Vis de pigmento marrom

Na Figura 23 é ilustrada a varredura de comprimento de onda UV-Vis (200-800 nm) do pigmento extraído de lombo suíno cru e assado. Os resultados mostraram que a faixa de absorção do pigmento marrom ocorreu em 200-300 nm, que teve uma absorção máxima em 203 nm, seguida por 240-260 nm, e os valores de absorção diminuíram em direção à região visível. A característica de absorção do pigmento marrom foi semelhante aos espectros de absorção de UV-Vis do pigmento de melanina (TU et al., 2009; CHANG et al., 2021). O aumento no comprimento de onda diminui a absorbância do pigmento melanina progressivamente. Este fato é justificado pela presença da estrutura conjugada e complexa da melanina. Esta propriedade da melanina é confirmada pela comparação com as descrições anteriores do pigmento e avaliação da melanina sintética (TU et al., 2009; KIMURA et al., 2015).

Figura 23 - Espectro UV-Vis de pigmento marrom de lombo suíno cru (■) e assado a 20 (■) e 40 min (■) a 180°C; a 20 (■) e 40 min (■) a 200°C e a 20 (■) e 40 min (■) a 220 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A característica de absorção do pigmento marrom em 203 nm também foi semelhante ao espectro de absorção UV-Vis de pigmentação de melanina (*Lo*-melanina) produzido por *Lysobacter oligotrophicus* (KIMURA et al., 2015), melanina produzida em frango defumado com açúcar chinês (CHANG et al., 2021) e pigmento marrom extraído e purificado de cogumelo frito a vácuo (LIU et al., 2018). Conforme mostrado na Figura 23, os menores picos de absorbância registrados foram da estrutura de lombo suíno cru. Os picos de absorbância aumentaram proporcionalmente com o tempo e temperatura de assamento. Durante o assamento de lombo suíno ocorrem reações simultâneas que favorecem o escurecimento superficial. Dessa forma, o maior pico de absorbância registrado foi da amostra de lombo suíno assada a 220 °C por 40 min.

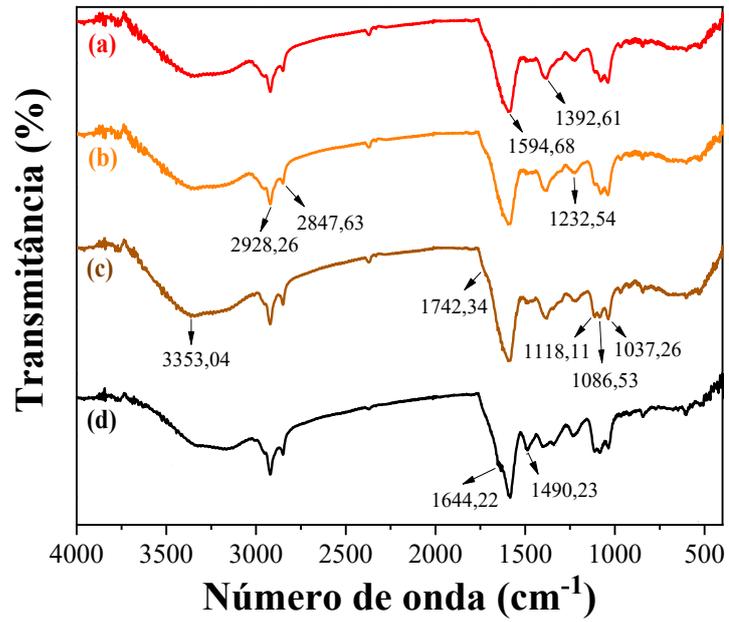
3.3.8.2 Ensaio de FTIR de pigmento marrom

A Figura 24 mostra os espectros de infravermelho dos extratos de lombo suíno cru e assados. Os espectros do pigmento marrom apresentaram bandas de vibração semelhantes aos espectros apresentados na Figura 22 para crosta de lombo suíno assado. A banda larga e forte em $3353,04\text{ cm}^{-1}$ é característica de grupos OH ou grupos NH (CHANG et al., 2021). As bandas de absorção em $2928,26$ e $2847,63\text{ cm}^{-1}$ são atribuídos ao alongamento simétrico e assimétrico

de grupos CH_2 , respectivamente. Estas bandas são típicas de grupos CH aromáticos de porções de indol presentes em moléculas de pigmentos de melanina (ARAUJO et al., 2012; KIMURA et al., 2015). A banda em 1644,20 especifica a presença de grupos $\text{C} = \text{C}$ ou $\text{C} = \text{O}$ na molécula do pigmento marrom (AKYUZ et al., 2012; LIU et al., 2018). A forte banda em 1594,68 cm^{-1} corresponde ao modo de flexão NH (MOHSIN et al., 2019). A banda de absorção em 1490,23 cm^{-1} pode ser atribuída a grupos NCN ou NH_2 de melaninas protonadas (MIRCESCU et al., 2012). A banda de absorção em 1392,61 cm^{-1} atribuída ao modo de curvatura CH foi observada em espectros de melanina microbiana (AGHAJANYAN et al., 2005; KIMURA et al., 2015). As bandas de absorção no intervalo de 1232,54 a 1037,26 cm^{-1} foram relatadas em espectros de melanina sintetizada correspondendo a vibrações de alongamento de grupos CO. A banda de absorção em 1232,54 cm^{-1} é atribuída ao alongamento de grupos COH de fenólicos ou alcoólicos, a banda em 1086,53 cm^{-1} corresponde ao alongamento assimétrico do grupo carbonila COC (TU et al., 2009; DREWNOWSKA et al., 2015). Além disso, as bandas nesta região foram identificadas em espectros de melanoidinas de soluções modelos a partir de diferentes vias (MOHSIN et al., 2020). Por fim, vale apontar que nossos resultados sugerem que o pigmento marrom extraído de crosta de lombo suíno assado é um tipo de pigmento semelhante à melanina.

Conforme apontado anteriormente, as bandas de absorção características de melanoidinas são CH_3 , CH_2 , $\text{C} = \text{O}$ e $\text{C} - \text{O}$, sendo observadas também em espectros de FTIR de hidroximetilfurfural e furfural. Estas bandas de vibração são cruciais para a classificação de diferentes composições moleculares de indicadores de reação de Maillard (MOHSIN et al., 2019, 2020, 2022). Entretanto, nos espectros de extratos de pigmento marrom não foi observada a intensa banda característica de melanoidinas na altura de 1742,34 cm^{-1} (vibração correspondente a $\text{C} = \text{O}$), anteriormente observada nos espectros de crosta de lombo suíno assado (Figura 22). A vibração branda na região de 1742,34 cm^{-1} proveniente de grupos $\text{C} = \text{O}$ pode excluir a possibilidade do pigmento ser originado de produtos de Amadori descarboxilado, como observado em estudo anterior (IOANNOU; VAROTSIS, 2016). Entretanto, é verdadeira a possibilidade do processo de extração não ter sido efetivo na solubilização de pigmento marrom formado na crosta de lombo suíno assado. Dessa forma, se torna interessante um estudo de viabilidade de metodologias de extração visando um extrato representativo do real conteúdo de compostos do pigmento marrom.

Figura 24 - Espectros FTIR de pigmento marrom de lombo suíno cru (■) e assado por 40 min a 180 (■), 200 (■) e 220 °C (■).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.4 CONCLUSÃO

O minucioso controle da temperatura na cavidade do forno foi crucial para entender o efeito da temperatura de assamento nos perfis de temperatura, umidade global e local, mudança de cor superficial e formação de crosta em lombo suíno assado. Com o tempo de assamento, a uma dada temperatura de processo, ocorre o aumento da temperatura superficial e central finais, com redução da umidade global e local e aumentos da mudança de cor superficial e da espessura da crosta. Assim, os experimentos forneceram dados importantes para compreensão das alterações físicas de cor e formação de crosta em lombo suíno assado.

Os modelos matemáticos que descrevem a evolução de parâmetros de cor de lombo suíno assado em função da temperatura da crosta. Além da desnaturação da mioglobina e da hemoglobina, as alterações estruturais que modificam a dispersão de luz são responsáveis pela evolução da cor total em lombo suíno assado. A coordenada de cor L^* foi a que mais contribuiu para a evolução da cor total. A evolução da cor foi mais rápida com o aumento da temperatura de assamento devido a uma maior desnaturação de proteínas. Ainda, o estudo dos perfis de temperatura e perda de umidade durante as condições de assamento representaram bem as fases de transferências de calor e massa no processo. Os modelos matemáticos descreveram com precisão a relação entre os parâmetros de cor de a^* , b^* e L^* com a temperatura e umidade da crosta de lombo suíno assado. Os modelos propostos descreveram adequadamente esse comportamento, que é uma ferramenta importante para o dimensionamento de uma cavidade de forno ou seleção da definição do procedimento de assamento.

A escassez na literatura sobre a reação de Maillard e oxidação lipídica em carnes assadas é parcialmente suprida pelo presente trabalho. Os espectros de UV-Vis e FTIR que caracterizam os possíveis compostos indicadores de escurecimento são os primeiros passos para estudos mais amplos necessários nesta área. Os resultados de bandas de vibrações características aos compostos indicadores de Maillard foram mais intensos com o aumento da temperatura de assamento e pode ser considerada uma prova de que as reações são favorecidas pelas altas temperaturas na crosta durante o processo de assamento. Para trabalhos futuros, sugere-se a identificação e quantificação de compostos de escurecimento na crosta de carne assada. Além disso, são escassos os estudos que envolvem correlações entre a formação de compostos formados e o desenvolvimento da cor de carne. É necessária uma compreensão mais completa dessas reações na carne para descobrir como promover cor, sabor e aromas com segurança alimentar, e atenuar a formação de possíveis compostos tóxicos durante o processo de assamento.

CAPÍTULO 4

4 ESTUDO DA DEFORMAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LOMBO SUÍNO DURANTE ASSAMENTO COM TEMPERATURA CONTROLADA

4.1 INTRODUÇÃO

O assamento é um processo de cozimento comumente empregado em carnes para garantir a segurança microbiológica, modificar as características sensoriais e biodisponibilidade da carne. O cozimento em fornos ocorre pela radiação emitida pelas paredes e convecção de ar quente (FELLOWS, 2016). O calor fornecido pelo forno é absorvido pela superfície da carne e é conduzido gradativamente até o seu centro geométrico. Portanto, a superfície da carne assada é exposta a altas temperaturas que reduzem a sua atividade de água e favorecem a formação da crosta característica do processo de assamento (FELLOWS, 2016). Além disso, para garantir o consumo seguro de carne suína, a uma temperatura interna final deve atingir no mínimo de 70 a 75 °C (CHIAVARO et al., 2009; AMSA, 2015; CHANNON; D'SOUZA; DUNSHEA, 2016; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021).

O cozimento tem como objetivo primordial a modificação das características sensoriais da carne crua por meio de alterações bioquímicas e físicas promovidas pelo aquecimento (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014). O aquecimento provoca mudanças simultâneas nas propriedades físicas da estrutura heterogênea da carne. A desnaturação térmica de proteínas reduz o volume miofibrilar causando alterações na estrutura e distribuição de água e nutrientes na carne (TORNBORG, 2005). Durante o assamento, a carne pode perder grande quantidade de massa por evaporação e gotejamento de líquido com sólidos dissolvidos (CHENG; SUN, 2008), sendo altamente dependente das condições de assamento. A redução do comprimento do sarcômero exerce uma pressão sobre a água nas miofibrilas que é expelida pelos canais porosos da estrutura da carne, favorecendo o encolhimento, perda da suculência e redução da maciez da carne (OFFER et al., 1989; TORNBORG, 2005). Além disso, a perda de massa (água, gordura, sólidos solúveis) resulta na concentração de macronutrientes, que elevam o valor energético (em kJ/kg) da carne cozida (DELGADO-ANDRADE et al., 2010).

Se as principais variáveis de processo que influenciam a qualidade de lombo suíno assado forem conhecidas e controladas, o processo de assamento pode ser estudado minuciosamente para alcançar dados precisos para o desenvolvimento de modelos matemáticos

que descrevam as mudanças que ocorrem na estrutura complexa da carne e ajudar a compreender, controlar e otimizar a qualidade do produto final. Diante disso, torna-se relevante um estudo sistemático da evolução de propriedades físicas de lombo suíno assado. Aliado a isso, pode ser usado um forno de cavidade termicamente simétrica que garante o controle preciso do processo de assamento e conseqüentemente, promete dados experimentais precisos de propriedade físicas durante o assamento (SILVA et al., 2022). Existe a necessidade de integrar o entendimento estrutural e física com a modelagem matemática dos dados, a fim de entender e melhorar a previsão de características de qualidade e garantir qualidade ao consumidor. A alteração de propriedades físicas pode ser atribuída às variações de perda de umidade. Contudo, a falta de correlações entre as mudanças estruturais e propriedades físicas de lombo suíno assado que evoluem simultaneamente merece mais investigação e esclarecimentos.

Este trabalho teve como objetivo investigar as alterações de perdas por cozimento e de sólidos solúveis, força de cisalhamento, suculência, composição nutricional e valor energético de lombo suíno durante o processo de assamento e desenvolver modelos matemáticos que descrevem essas alterações em função de temperatura central final e umidade global. Além disso, buscou-se entender a inter-relação entre essas propriedades físicas.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Matéria-prima

Lombo suíno da mesma procedência e classificação prévia citadas no item 3.2.1 do Capítulo 3 foi utilizado neste estudo.

4.2.2 Caracterização térmica de lombo suíno

4.2.2.1 Capacidade de Retenção de Água (CRA)

A capacidade de retenção de água (CRA) descreve a capacidade da carne em reter água durante a aplicação de forças externas, como corte, aquecimento, trituração, prensagem e centrifugação (Bengtsson et al., 1976). Como se deseja determinar a capacidade de retenção de água em função da temperatura e na ausência de evaporação de água, a metodologia proposta por Bengtsson et al (1976) foi utilizada. Desta forma, fatias finas de carne (3-4 mm de espessura) aproximadamente $9,50 \pm 0,25$ g foram embaladas em embalagens *sous vide* e imersas em um banho termostático por 30 min em temperaturas do banho de 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 °C. Após o tratamento térmico, as amostras foram enxutas por 1 min usando toalhas de papel absorvente em temperatura ambiente. Para cada temperatura, o teor de água foi obtido pela pesagem da amostra e o valor final de capacidade de retenção de água foi definido no tempo de 30 min. A função sigmoide (Equação 7) foi ajustada aos dados experimentais para tentar representar a CRA do lombo suíno:

$$CRA(T) = C_i - \frac{a_1}{1 + a_2 \exp(-a_3(T - T_R))} \quad (7)$$

onde C_i é o teor de umidade inicial da amostra crua, T é a temperatura em °C e T_R é o centro da curva logística. Os parâmetros desconhecidos a_1 , a_2 , a_3 e T_R , foram estimados por regressão linear usando o método de Levenberg-Marquardt (van der Sman, 2007a; van der Sman, 2007b).

4.2.2.2 Módulo de Elasticidade (G')

O módulo de elasticidade (G') da carne muda durante o processo de assamento, e presume-se que G' seja função da temperatura. Dessa forma, uma expressão para $G'(T)$ pode ser útil para explicar fisicamente mudanças que ocorrem no lombo suíno assado. Para a medição reológica de lombo suíno, a metodologia proposta por Rabeler e Feyissa (2018) foi utilizada. A carne foi fracionada em fatias de 3 mm de espessura. Círculos de 30 mm foram cortados das fatias usando um cortador afiado, evitando gordura e qualquer área irregular. Os discos foram armazenados sob refrigeração até a análise. Um reômetro com temperatura controlada (Haake Mars Rheometer, Type 006–0572; Thermo Fisher Scientific, EUA) e equipado com uma placa de fixação paralela de 20 mm foi utilizado para a análise. Todas as análises de oscilação dinâmica foram realizadas com um intervalo de 3 mm entre as placas. As análises de oscilação dinâmica foram realizadas a uma frequência de 2 Hz e uma tensão constante de 3 Pa. O valor constante para a frequência e a tensão foram escolhidos dentro da região viscoelástica linear que foi determinada pela realização de frequência (0,1-10 Hz) e varreduras de tensão (0,1-1000 Pa). A temperatura da amostra foi aumentada gradativamente de 30 para 90 °C com etapas de 5 °C e tempos de espera de 3 min em cada etapa de temperatura antes do registro dos dados. Mudanças no módulo elástico foram registrados diretamente pelo software do reômetro (Haake RheoWin 4). A evolução G' e o ângulo de fase, a relação entre o módulo de viscosidade e o módulo de elasticidade (φ), com a temperatura, foram registrados pelo software do reômetro em quatro réplicas. Modelos matemáticos foram ajustados à mudança de G' em função da temperatura em respectivos intervalos de temperatura, conforme já realizado para carne bovina (FEYISSA; GERNAEY; ADLER-NISSEN, 2013; MOYA *et al.*, 2021; TORNBERG, 2005), peito de frango (RABELER; FEYISSA, 2018) e bacalhau (BLIKRA *et al.*, 2020).

4.2.2.3 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

As transições térmicas de lombo suíno cru foram analisadas usando um calorímetro diferencial de varredura (DSC, PerkinElmer Jade®, USA). Cada amostra de aproximadamente 25 mg de tecido muscular foi utilizada para a análise. A amostra foi alocada em recipiente de alumínio hermeticamente fechado e aquecido de 30 a 95 °C, com uma taxa de aquecimento de 5 °C·min⁻¹, sob um fluxo de N₂ de 50 mL·min⁻¹.

4.2.3 Unidade experimental e assamento de lombo suíno

A unidade experimental foi a mesma apresentada no item 3.2.2 do Capítulo 3. O processo de assamento de lombo suíno foi realizado conforme item 3.2.3, em temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Amostras cuboides retangulares (30 x 30 x 40 mm) de aproximadamente 40 g foram pesadas, dimensionadas e por fim submetidas ao assamento em temperaturas selecionadas. Foram realizados ensaios de perdas por cozimento (perda de massa e sólidos solúveis), força de cisalhamento, suculência, encolhimento das dimensões (largura, altura e comprimento) e encolhimento de volume, composição centesimal e valor energético.

4.2.4 Perdas por cozimento

As perdas por cozimento foram avaliadas por meio das perdas de água e de sólidos solúveis durante o assamento de lombo suíno nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C.

4.2.4.1 Perda de massa

A perda de massa foi calculada como a diferença percentual de massa entre as amostras frescas e cozidas em relação à massa da amostra de carne fresca, como descrito na Equação 8.

$$PC (\%) = \frac{m_{f(t=0)} - m_{c(t)}}{m_{f(t=0)}} \times 100 \quad (8)$$

onde PC é a perda por cozimento (%), $m_{f(t=0)}$ é a massa da amostra fresca no tempo t (g) e $m_{c(t)}$ é a massa da amostra seca (g).

4.2.4.2 Perda de Sólidos Solúveis

A massa seca na amostra diminui com o gotejamento de líquido contendo sólidos dissolvidos. O exsudado coletado no fundo da forma foi evaporado a 60 °C em estufa para a determinação da massa de sólidos dissolvidos perdidos. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras. Os sólidos solúveis perdidos (SSP) foram determinados a partir da Equação 9.

$$SSP (\%) = \frac{m_{ss}}{m_{seca(t=0)}} \times 100 \quad (9)$$

onde SSP são os sólidos solúveis perdidos (%), $m_{seca(t=0)}$ é a massa seca inicial da amostra (g) e m_{ss} é a massa de sólidos expelidos da amostra assada (g).

4.2.5 Textura

A avaliação da textura de lombo suíno durante o assamento foi determinada por métodos objetivos físicos de força de cisalhamento e suculência por meio de análises instrumentais em texturômetro.

4.2.5.1 Força de cisalhamento

A força de cisalhamento foi determinada para cada amostra, cortando-a perpendicularmente à orientação longitudinal das fibras musculares. Para isso, um acessório de cisalhamento Warner-Bratzler (1 mm de espessura) foi acoplado a um analisador de textura TA-XT2 (Texture Technologies Corp., Scardale, NY, EUA) equipado com uma célula de carga de 25 kg. O teste de cisalhamento com a amostra foi realizado a uma velocidade de pré-teste de $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, teste de $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ e pós-teste de $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Esse teste foi realizado em 3 diferentes locais das amostras de carne crua e cozida. Os valores da força de cisalhamento desenvolvidos durante os cortes das amostras com a célula de Warner-Bratzler, em diferentes locais da amostra, foram utilizados para produzir um único valor de força de cisalhamento médio para cada amostra.

4.2.5.2 Suculência instrumental

A suculência foi determinada conforme metodologia adaptada de Lucherik, et al. (2017). Após 10 min de descanso, as amostras assadas foram cortadas longitudinalmente (espessuras $\sim 1,5 \text{ mm}$) e envolvidas por folhas de papel filtro qualitativo (9 cm de diâmetro) previamente pesadas. Foram realizados ensaios de compressão em texturômetro TA-XT2 (Texture Technologies Corp., Scardale, NY, EUA) utilizando uma sonda (*probe*) cilíndrica de 50 mm de diâmetro com uma força de compressão a 78,45 N por um tempo de 30 s. O ensaio foi realizado a uma velocidade de pré-teste e teste de $3,70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ e de pós-teste de $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Após o ensaio de compressão, sem a amostra, o papel filtro contendo o exsudado liberado foi imediatamente pesado. A porcentagem de líquido liberado foi dimensionada pela Equação 10.

O líquido liberado pode ser correlacionado com a suculência da amostra ou com sua capacidade de retenção de água.

$$\text{Líquido liberado (\%)} = \frac{(P_f - P_i)}{A} \times 100 \quad (10)$$

onde *Líquido liberado (%)* é o exsudado liberado pela amostra de lombo suíno assado, P_i é peso inicial do papel filtro, P_f é peso final do papel filtro e A é a peso da amostra.

4.2.6 Encolhimento das amostras durante o assamento

O encolhimento das amostras assadas foi obtido pelas variações das dimensões e pela determinação do volume aparente, determinado pela imersão da amostra em solvente.

4.2.6.1 Dimensões

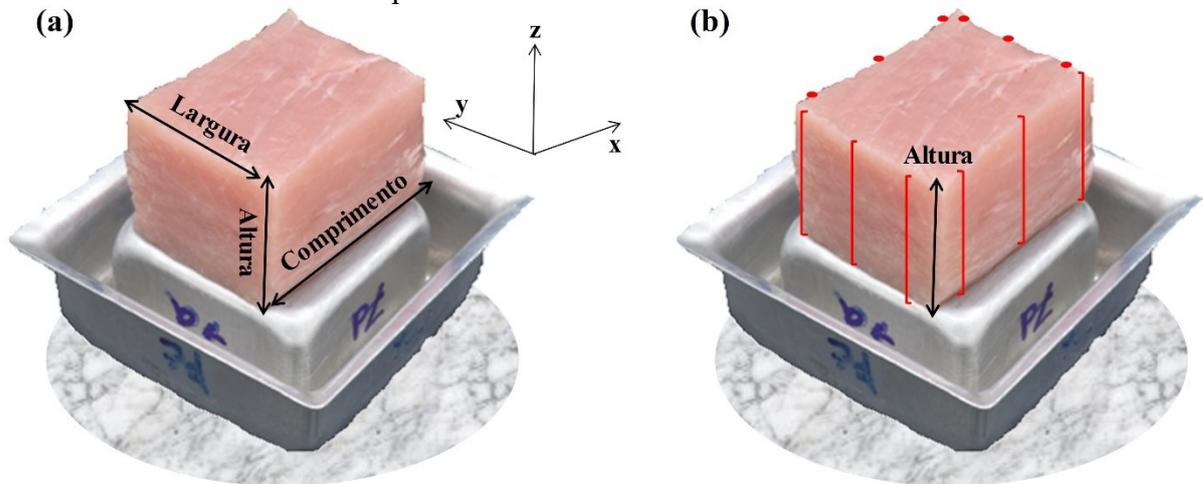
As amostras no formato de cuboides retangulares (30 x 30 x 40 mm) foram obtidas de forma padronizada. A direção do comprimento foi atribuída ao longo da orientação da fibra e a largura e a altura atribuídas na orientação perpendicular às fibras (na direção y e z, respectivamente), como ilustrado na Figura 25a. O encolhimento das amostras durante o assamento foi obtido por medidas manuais com paquímetro digital (Mitutoyo 500-196-30B). A medida de cada dimensão foi obtida avaliando as 4 faces correspondentes do cuboide retangular, tomando 3 medidas entre as arestas de cada face, totalizando 12 medidas por dimensão para compor um valor médio. A Figura 24b exemplifica como as medidas são obtidas para a dimensão da altura da amostra. As amostras foram medidas antes e depois do assamento usando paquímetro digital, obtendo as dimensões iniciais (X_o) e finais (X) em mm.

O coeficiente de encolhimento em uma dada direção ($E_{\text{Direção}}$) foi definido com a Equação 11:

$$E_{\text{Direção}}(\%) = \left(1 - \frac{X}{X_o}\right) \times 100 \quad (11)$$

onde $E_{\text{Direção}}(\%)$ é coeficiente de encolhimento em determinada direção, X_o é a dimensão na direção inicial e X é a dimensão da direção final da amostra.

Figura 25 - Esquema de dimensionamento do cuboide retangular de lombo suíno: (a) dimensões e direções avaliadas na amostra e (b) exemplo de obtenção de medidas para compor valor médio de altura da amostra.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.6.2 Volume aparente

Considerando que o encolhimento da carne não é isotrópico, a redução do volume irregular da carne assada também foi determinada por deslocamento de solvente ou medida de empuxo. Dessa forma, o volume aparente foi determinado indiretamente pela medida da força do empuxo (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980). N-heptano foi usado como solvente para determinar o coeficiente de encolhimento, pois não interage com os constituintes das amostras no curto tempo de medida. Além disso, esse solvente possui uma densidade relativamente menor, garantindo a submersão completa das amostras no líquido (SAADCHOM et al., 2011). A amostra foi presa a um gancho de aço conectado a uma abertura da parte inferior da balança analítica (Marte, Modelo-AY220, Filipinas) (YAN; SOUSA-GALLAGHER; OLIVEIRA, 2008). A Equação 12 foi utilizada para obter o volume aparente das amostras:

$$V_{ap} = \frac{m_a - m_n + m_{hn} - m_{ha}}{\rho_{sol}} \quad (12)$$

onde V_{ap} é o volume aparente da amostra (cm^3), m_a é a massa da amostra (g), m_n é massa da amostra em *n*-heptano (g), m_{hn} é massa do gancho em *n*-heptano (g), m_{ha} é a massa do gancho no ar (g) e ρ_{sol} é a densidade de *n*-heptano ($0,685 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

O coeficiente de encolhimento do volume ($E_{V_{ap}}$) foi definido pela Equação 13:

$$E_{V_{ap}}(\%) = \left(\frac{V_{apO} - V_{apF}}{V_{apO}} \right) \times 100 \quad (13)$$

onde V_{apF} é o volume aparente final e V_{apO} é o volume aparente inicial da amostra.

4.2.7 Composição centesimal

A composição centesimal do lombo suíno cru, assado até a temperatura interna de 75 °C e por 40 min em temperaturas de 180, 200 e 220 °C foram determinadas em triplicata conforme métodos da *International Organization for Standardization* (ISO). O teor de umidade e voláteis da carne foi determinado por secagem em estufa a 103 °C pelo método ISO 1442 (ISO, 1997). O teor de proteína total (base úmida) ($N_{total} \times 6,25$) foi avaliado pelo método Kjeldahl ISO 1871 (ISO, 2009). Foi determinado também o teor total de gordura intramuscular pelo método ISO 1443 (ISO, 1973) e o teor de resíduo mineral fixo pelo método ISO 936 (ISO, 1998). A composição centesimal do lombo suíno cru e assado foi determinada e apresentada em base úmida e base seca para melhor entendimento do fluxo mássico durante o processo de assamento.

4.2.7.1 Valor energético

O valor energético total foi calculado com base na quantidade de gordura e proteína na composição centesimal ($g \cdot 100 g^{-1}$) e expresso em quilocalorias ($kcal \cdot 100 g^{-1}$). Para o cálculo foram consideradas 9 $kcal \cdot g^{-1}$ de gordura e 4 $kcal \cdot g^{-1}$ de proteína (RHEE; GRIFFITH-BRADLE; ZIPRIN, 1993).

4.2.8 Modelagem matemática de propriedades físicas de lombo suíno assado

Modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais de propriedades físicas como as perdas por cozimento, perdas de sólidos solúveis, força de cisalhamento, suculência, encolhimento de volume e valor energético em função da temperatura do centro (T_{centro}) e da umidade global (U_{global}) de lombo suíno assado. Foram utilizados o modelo sigmoidal de Boltzmann (Equação 14) e o modelo linear (Equação 15).

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_c}\right)^p} \quad (14)$$

onde y é a propriedade física, os parâmetros A_1 e A_2 correspondem aos valores iniciais e finais, respectivamente, p é a taxa relativa máxima e x_c representa o ponto de inflexão da curva para a curva ajustada em função da temperatura do centro ($^{\circ}\text{C}$) ou umidade global (b.s).

$$y = b + cx \quad (15)$$

onde y é a força de cisalhamento, suculência ou encolhimento de volume, b e c são parâmetros estimados para cada uma das curvas ajustadas em função da umidade global (b.s).

4.2.9 Análise dos resultados

Os resultados foram expressos em média \pm desvio padrão, que foram calculados com o auxílio do software estatístico OriginPro 2018. O OriginPro 2018 foi usado também para verificar diferenças significativas entre os tratamentos por análise de variância unilateral (ANOVA) seguida pelo teste de diferença significativa de Tukey (HSD) em $p \leq 0,05$ para identificar diferenças entre os grupos. Todos os experimentos foram realizados em triplicata. O ajuste dos modelos aos dados experimentais foi avaliado pela raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2) pelas Equações 3 e 4, respectivamente. A análise de correlação foi avaliada determinando o coeficiente de correlação de Pearson (r) com um determinante de significância de ($p < 0.05$) pelo jamovi (versão 2.0) (JAMOVI, 2021).

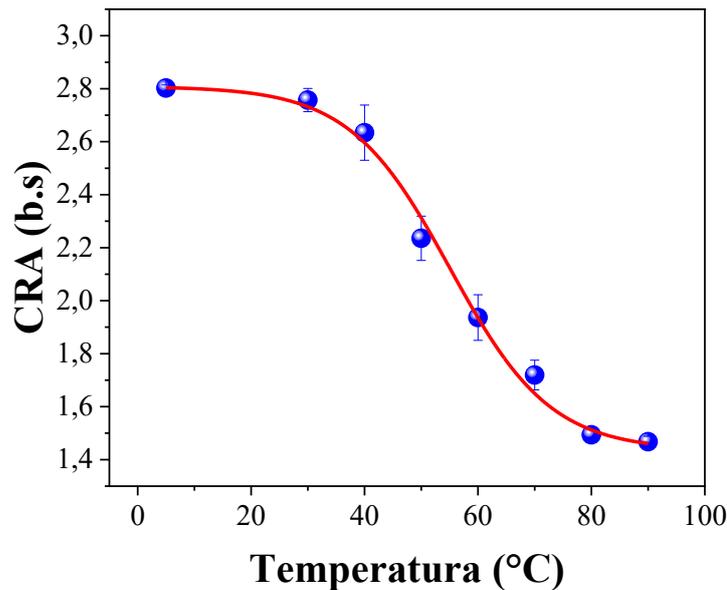
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES PRÉVIOS

4.3.1 Capacidade de Retenção de Água (CRA)

A Figura 26 ilustra o efeito da temperatura sobre a capacidade de retenção de água (CRA) e a expressão sigmoide ajustada correspondente. Como esperado, o conteúdo de água diminuiu em perfil sigmoide com o aumento da temperatura que favorece a desnaturação térmica das proteínas durante o cozimento de carnes. Dessa forma, a capacidade reter água na carne foi medida inicialmente em $2,80 \text{ kg água} \cdot \text{kg sólido seco}^{-1}$ diminuiu até atingir um mínimo

de 1,46 kg água·kg sólido seco⁻¹ seco após 30 min (condição de umidade de equilíbrio) em banho-maria a 90 °C. Os valores experimentais de CRA encontrados foram bastante semelhantes aos encontrados para carne bovina por Goñi e salvadori (2010) e Moya *et al.* (2021), no intervalo de aproximadamente 3,0 – 1,0 e 2,8 – 1,4 kg água·kg sólido seco⁻¹, respectivamente. Além disso, os pontos de inflexão das curvas foram de 48,27 e 66,76 °C, respectivamente. Em comparação com os resultados deste trabalho, a carne bovina apresentou menor CRA (GOÑI; SALVADORI, 2010). Por outro lado, cortes de bacalhau apresentaram alta CRA em faixa de temperatura semelhante, não apresentando diferenças significativas de 40 a 90 °C. É importante lembrar que cada CRA é específica da matéria-prima e é afetada pelas condições antes, durante e depois do sacrifício do animal (BLIKRA; SKIPNES; FEYISSA, 2019).

Figura 26 - Capacidade de retenção de água (CRA) em função da temperatura para lombo suíno.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os valores experimentais de CRA em função da temperatura foram ajustados à Equação 7. Os parâmetros ajustados foram: $C_i = 2,809$ kg água·kg sólido seco, $a_1 = -1,37$, $a_2 = 0,27$, $a_3 = 0,11$ °C⁻¹ e $T_R = 66,84$ °C. A expressão sigmoide foi bem ajustada aos dados experimentais tendo $R^2 = 0,99$ e $RMSE = 1,10$.

4.3.2 Módulo de Elasticidade (G')

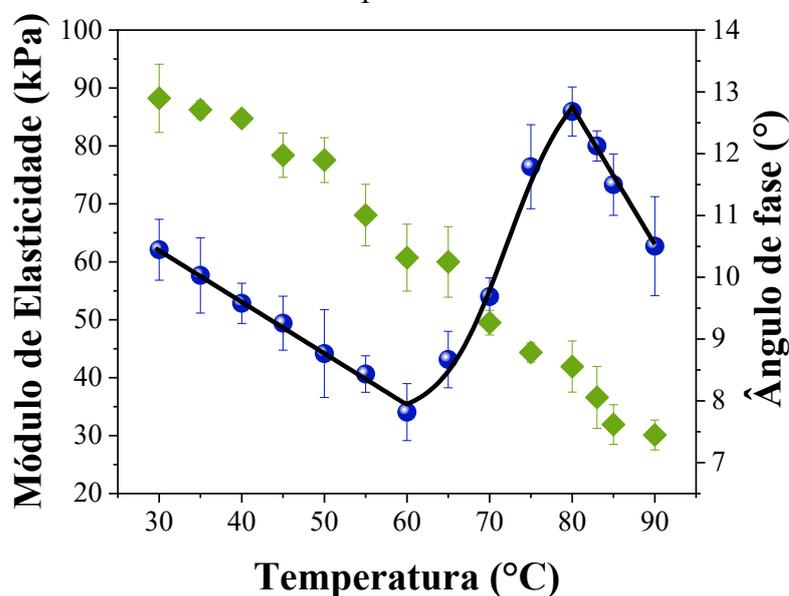
A Figura 27 ilustra o módulo de armazenamento (G') e o ângulo de fase (ϕ) em função da temperatura para o lombo suíno. O G' diminui ligeiramente até atingir um valor mínimo a 60 °C. No entanto, aumenta acentuadamente até 80 kPa de 65 a 80 °C e diminui em temperaturas acima de 80 °C. O ângulo de fase manteve uma diminuição gradual em toda a faixa de temperatura avaliada. O perfil de G' em função da temperatura concorda com os resultados encontrados por Moya et al (2021) para *Longissimus dorsi* bovino, mas G' aumentou ainda nos 50 °C e o G' máximo (cerca de 40 kPa) é inferior ao encontrado para lombo suíno ($88,24 \pm 7,53$ kPa). Tornberg (2005), Rabeler e Feyissa (2018) e Blikra, Skipnes e Feyissa (2019) encontraram tendências semelhantes na faixa de 25 a 100 °C para *M. biceps femoris* bovino, peito de frango e lombo de bacalhau, respectivamente, com G' máximos de aproximadamente 80, 92 e 48 kPa, esses valores tendem a diferir por corresponderem a diferentes músculos e espécies. Comportamentos diferentes de G' entre as carnes podem ser justificados pelas diferenças qualitativas e quantitativas de proteínas entre as carnes (TORNBERG, 2005; RABELER; FEYISSA, 2018). O G' representa a alteração na microestrutura da carne devido à desnaturação da proteína, que resulta em um endurecimento da carne. No intervalo de 60 a 80 °C ocorre a desnaturação gradual da miosina, colágeno e actina. Isso leva a mudanças estruturais no interior da carne por encolhimento longitudinal e transversal das fibras da carne e solubilização do tecido conjuntivo. Como resultado, a carne torna-se mais compacta e dura, levando ao aumento do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura (MOYA *et al.*, 2021; RABELER; FEYISSA, 2018; TORNBERG, 2005).

O módulo de elasticidade para lombo suíno, para temperaturas entre 30 e 90 °C, pode ser definido pela Equação 16:

$$\begin{aligned}
 G_a + G_b \cdot T_a & \quad \text{se } 30 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C} \\
 G_d + \frac{G_c - G_d}{(1 + \exp(-k(T_b - T_c)))} & \quad \text{se } 60 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 80 \text{ }^\circ\text{C} \\
 G_e + G_f \cdot T_d & \quad \text{se } 80 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 90 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{16}$$

onde $G_a = 88,76$ kPa e $G_b = -0,89$ kPa \cdot °C $^{-1}$ são parâmetros de ajuste linear (de 30 a 60 °C) com $R^2 = 0,99$ e $RMSE = 0,183$, $G_c = 33,16$ kPa, $G_d = 95,32$ kPa, $k = 17,96$ e $T_c = 72,47$ °C são parâmetros de ajuste sigmoidal (de 60 a 80 °C) com $R^2 = 0,99$ e $RMSE = 0,03$, $G_d = 276,89$ kPa e $G_e = -2,38$ kPa \cdot °C $^{-1}$ são parâmetros de ajuste linear (de 80 a 90 °C) com $R^2 = 0,97$ e $RMSE = 0,26$. A Figura 30 mostra o resultado experimental do módulo de elasticidade e seu ajuste.

Figura 27 - Módulo de elasticidade, G' (kPa) (●) (eixo esquerdo), e ângulo de fase, ϕ (°) (▲) (eixo direito), para lombo suíno *M. Longissimus dorsi* em função da temperatura de cozimento. Valores experimentais indicados por símbolos e valores estimados pela linha preta.



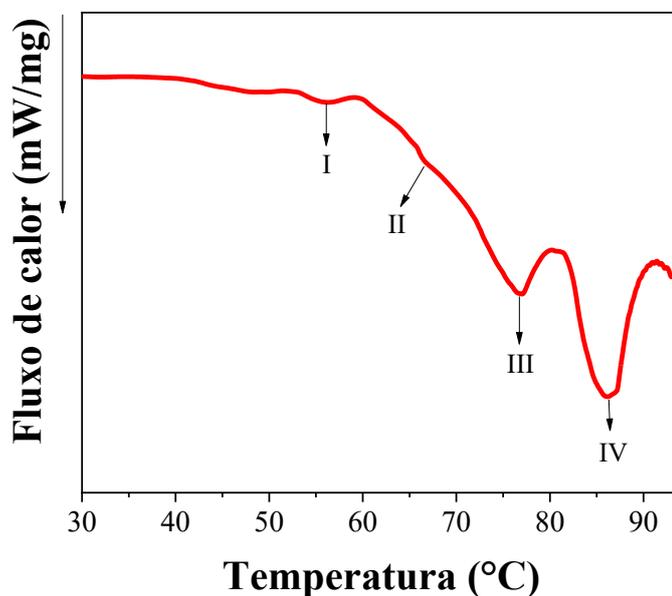
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.3.3 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A Figura 28 mostra o termograma DSC representativo de lombo suíno cru reproduzido de 30 a 95 °C. O termograma apresenta quatro transições endotérmicas relacionadas à desnaturação térmica de grupos específicos de proteínas. As transições endotérmicas foram registradas em cerca de 56,03, 66,52, 76,85 e 86,23 °C e correspondem aos picos I, II, III e IV, respectivamente. Os picos a 56,03 e 66,52 °C representam as transições endotérmicas da miosina e alterações no colágeno, respectivamente. Voutila *et al.* (2007) obtiveram picos em temperaturas de aproximadamente 64,9 °C para as baixas concentrações de colágeno (2,5-3,1 mg·g⁻¹) encontradas em *M. longissimus dorsi* suíno. Além disso, os autores encontraram maiores temperaturas de pico (63,5 a 66 °C) em músculos suínos (*M. semimembranosus* e *infraspinatus*) com maiores teores de colágeno (4,0 e 5,0 mg·g⁻¹, respectivamente). A próxima transição endotérmica, a 76,85 °C corresponde às proteínas sarcoplasmáticas. Salvador *et al.* (2009) encontraram a temperatura de desnaturação de concentrados de hemoglobina suína em 77,80 °C. A última transição a 86,23 °C corresponde à desnaturação da actina, que é a proteína miofibrilar mais termoestável. Bertram *et al.* (2006) relataram por meio de técnicas combinadas de DSC e (Ressonância Magnética Nuclear) RMN que no *M. longissimus dorsi* suíno ocorre a

desnaturação da miosina e actina em transições endotérmicas de 53-58 e 80-82 °C, respectivamente.

Figura 28 - DSC representativo de lombo suíno cru registrado a uma taxa de aquecimento de 5 °C·min⁻¹.



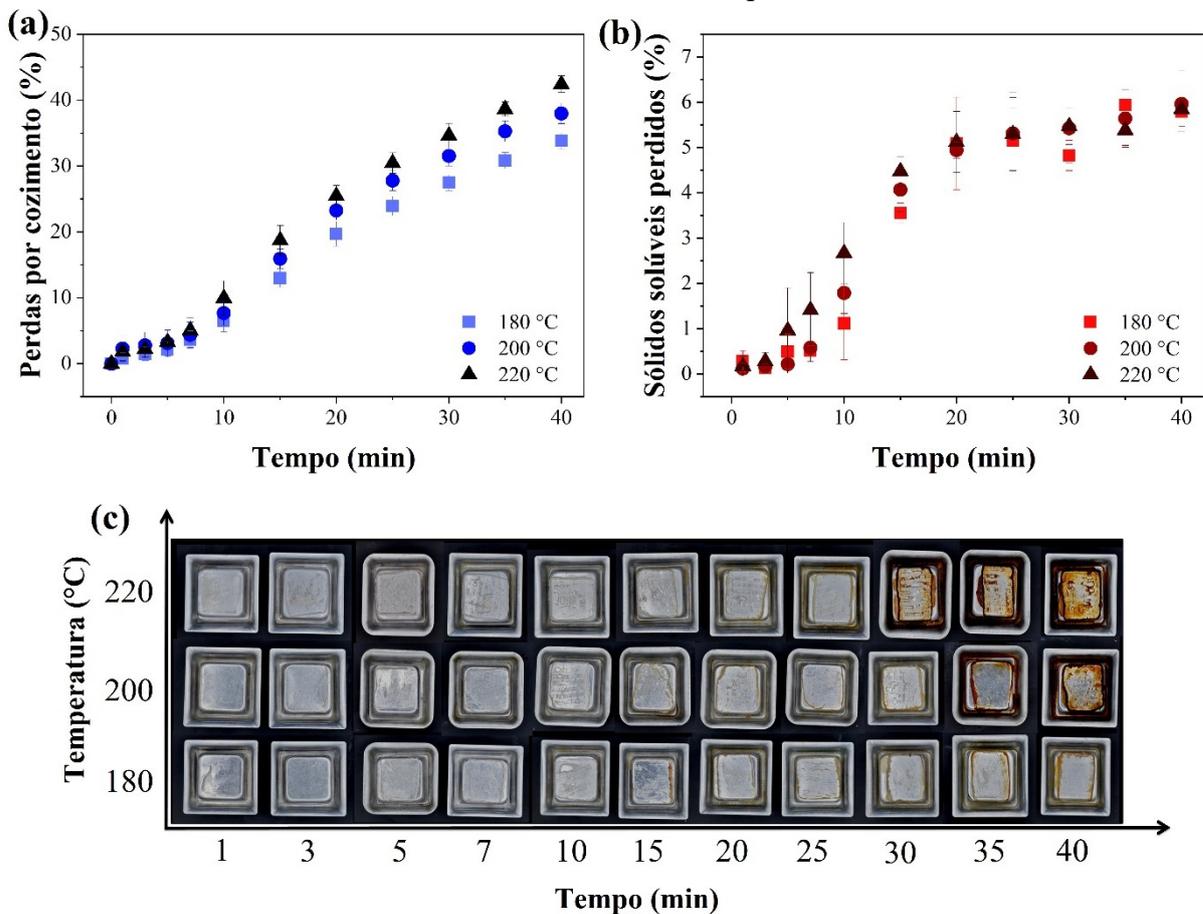
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As transições endotérmicas encontradas foram equivalentes às típicas encontradas na literatura para o mesmo músculo suíno (BERTRAM et al., 2006; BERHE et al., 2014; MITRA et al., 2018; AGAFONKINA; KOROLEV; SARANTSEV, 2019). As transições endotérmicas registradas na forma de picos nos termogramas DSC caracterizaram a desnaturação térmica das proteínas no lombo suíno. A miosina, proteínas sarcoplasmáticas, colágeno e actina são componentes estruturais da carne e são intimamente ligados às perdas por cozimento. Existe uma correlação entre a desnaturação de miosina e as mudanças induzidas pelo calor na água miofibrilar. Ainda, a correlação entre a desnaturação da actina e a expulsão de água induzida pelo calor da carne explica o aumento da perda de cozimento quando a carne é cozida a cerca de 80 °C (WOOD et al., 1995; AASLYNG et al., 2003; BERTRAM et al., 2006). O conhecimento da natureza da desnaturação térmica da proteína de lombo suíno é uma das ferramentas necessárias para o desenvolvimento da tecnologia de processamento térmico da carne.

4.3.4 Perdas por cozimento

A Figura 29a mostra o aumento das perdas de massa durante o assamento, com o aumento da temperatura. Ao atingir a temperatura interna de 75 °C, as perdas por cozimento foram de $19,69 \pm 1,87$, $15,91 \pm 1,47$ e $18,71 \pm 2,27$ %, respectivamente, para as temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Com o avanço do assamento, estas medidas tenderam a aumentar, atingindo $33,80 \pm 1,01$, $37,98 \pm 1,26$ e $42,43 \pm 1,02$ %, respectivamente. As perdas pelo cozimento aumentam proporcionalmente com o aumento da temperatura (HEYMANN et al., 1990; AASLYNG et al., 2003; THERKILDSEN et al., 2003; VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009; CRAWFORD et al., 2010; PÕLDVERE et al., 2016; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). Assim, o aumento da temperatura do forno resulta em gradientes de temperatura mais acentuados na carne (superfície e centro), menores tempos de cozimento e menores rendimentos (BENGTSSON; JAKOBSSON; SIK, 1976; AASLYNG et al., 2003; VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009).

Figura 29 - (a) Perdas pelo cozimento (PC) (%); (b) Sólidos solúveis perdidos (SSP) (%) e (c) fotografias ilustrando o acúmulo de sólidos solúveis nas formas durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As amostras assadas a 180, 200 e 220 °C atingiram 75 °C em aproximadamente $19,39 \pm 1,33$, $15,66 \pm 1,30$ e $15,33 \pm 2,64$ min, respectivamente (dados apresentados anteriormente). Os dados de perdas por cozimento (da cinética *on line*) foram obtidos nos tempos mencionados e os dados de sólidos solúveis perdidos (da cinética com abordagem destrutiva, ou seja, um experimento para cada ponto experimental) para amostras assadas a 180, 200 e 220 °C foram considerados nos tempos de 20, 15 e 15 min, respectivamente. Na faixa de temperatura de assamento estudada, não houve diferenças significativas ($p < 0,05$) nas perdas globais por cozimento e nas perdas de sólidos solúveis.

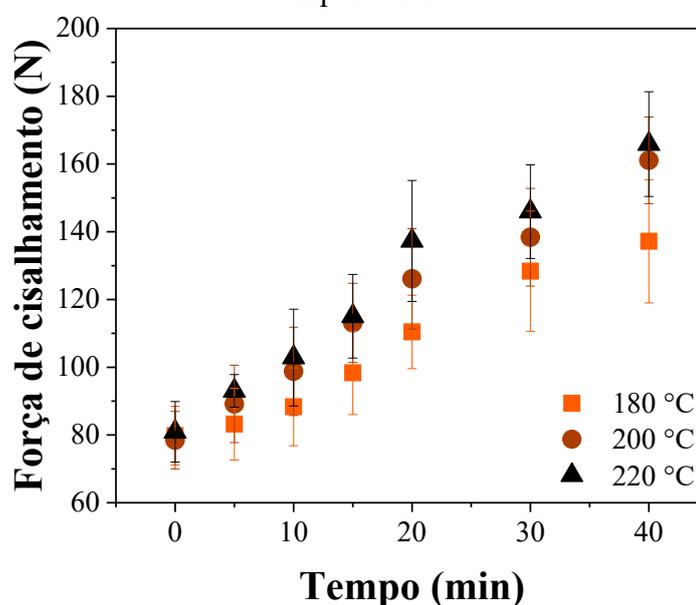
Como já discutido, as perdas de massa durante o cozimento ocorrem por evaporação e por gotejamento de líquido com sólidos dissolvidos (CHENG; SUN, 2008). Além da perda de água, são solubilizados nutrientes hidrossolúveis, como vitaminas, sais minerais e proteínas sarcoplasmáticas, caso a temperatura de solubilização do colágeno seja atingida (SÁNCHEZ DEL PULGAR; GÁZQUEZ; RUIZ-CARRASCAL, 2012; GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013). A Figura 29b ilustra a perda de sólidos solúveis durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas. A Figura 29c mostra qualitativamente o acúmulo de sólidos solúveis depositados nas formas durante o assamento. A atingir a temperatura interna de 75 °C as perdas de sólidos solúveis foram de $5,09 \pm 1,02$, $4,07 \pm 0,48$ e $4,48 \pm 0,32$ %, respectivamente para as temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Com o avanço do assamento estas medidas tenderam a aumentar, atingindo $5,79 \pm 0,44$, $5,96 \pm 0,73$ e $5,85 \pm 0,38$ % da massa seca inicial da amostra. Em relação à massa úmida inicial da amostra, as perdas de sólidos solúveis durante o assamento (40 min) a 180, 200 e 220 °C foram de $1,48 \pm 0,11$ (180 °C), $1,52 \pm 0,19$ (200 °C) e $1,49 \pm 0,09$ % (220 °C). Feyissa et al. (2009) observaram uma perda de $1,33 \pm 0,18\%$ de sólidos solúveis durante o assamento de lombo suíno a 175 °C, em relação à massa inicial da amostra, o que foi considerada desprezível. Essa hipótese fundamenta a transferência de massa baseada apenas no transporte de sólidos solúveis com a água, já que a carne contém baixo teor de gordura (FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009). Em outras palavras, considerou-se que não havia gordura nos sólidos acumulados fora da peça assada. Esta hipótese foi investigada e reportada de maneira mais minuciosa no tópico 4.3.7 (Composição centesimal).

4.3.5 Textura

4.3.5.1 Força de cisalhamento

A Figura 30 mostra o aumento da força de cisalhamento durante o assamento, com o aumento da temperatura. Inicialmente a força de cisalhamento de lombo suíno cru foi de $79,30 \pm 13,04$ N, ao atingir a temperatura interna de 75 °C, que aumentou para $110,081 \pm 18,313$, $114,19 \pm 18,56$ e $114,45 \pm 18,60$ N, respectivamente, para as temperaturas de 180 , 200 e 220 °C. Com o avanço do assamento esta medida tendeu a aumentar, atingindo $136,60 \pm 28,88$, $159,88 \pm 25,15$ e $165,57 \pm 22,10$ N, respectivamente, em 40 min de assamento a 180 , 200 e 220 °C. Os aumentos do tempo e da temperatura de assamento resultaram em maiores valores de força de cisalhamento. Entretanto, os dados de força de cisalhamento não apresentaram diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre as temperaturas avaliadas.

Figura 30 – Força de cisalhamento durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A resistência ao corte do lombo suíno assado (percebida como maciez pelos consumidores) é significativamente aumentada pelo tempo e temperatura final de cozimento (CRAWFORD et al., 2010; PÕLDVERE et al., 2016; WANG et al., 2019). Além disso, o aumento da temperatura de cozimento no forno causa rápidas alterações estruturais na proteína, favorecendo maiores valores de força de cisalhamento (CHIAVARO et al., 2009; WANG et al., 2019; SZMAŃKO et al., 2021). Vittadini et al (2005) obteve força de cisalhamento de 122 N para lombo suíno assado em forno de convecção natural a 180 °C, até atingir a temperatura interna de 75 °C. Além disso, a força de cisalhamento não apresentou diferença estatística quando o lombo foi assado em forno de convecção forçada e convecção combinado com vapor,

sendo 125,00 e 116,00 N, respectivamente, nas mesmas condições de processo. Por outro lado, Wang et al (2019) avaliaram a força de cisalhamento em função do tempo (5 a 20 min) e temperatura (120 a 180 °C) durante o assamento de lombo suíno e obtiveram valores médios no intervalo de 66,86 a 122,78 N. Em comparação, o lombo suíno assado em forno com injeção de vapor foi significativamente menos macio, onde o intervalo obtido foi de 73,03 a 130,83 N, com mesmas variáveis de processo. O aumento da força de cisalhamento com a temperatura de assamento também foi observado por Chiavaro et al (2009), para temperaturas de 100 a 140 °C. Eles observaram valores médios no intervalo de 136,20 a 170,80 N, quando lombo suíno foi assado em fornos de convecção forçada e convecção forçada combinado com vapor.

O comprimento das fibras musculares em amostras de lombo suíno assado também afeta os parâmetros de qualidade da carne cozida, principalmente a capacidade de retenção de água e a textura. Szymańko et al., (2021) verificaram forças de cisalhamento menores em amostras de lombo suíno assadas com fibras musculares paralelas (fibras longas) em amostras de lombo suíno assadas, comparadas com amostras de fibras diagonais (fibras curtas e longas). Este resultado foi relacionado a uma menor perda por cozimento, maior capacidade de retenção de água e por uma hidrólise térmica de colágeno mais avançada. Amostras com fibras mais curtas apresentaram sarcômeros mais curtos, menor diâmetro de fibra muscular e maior concentração de fibras por unidade de área de seção transversal do tecido muscular favorecendo aumento nos valores de força de cisalhamento muscular. A menor força de cisalhamento em amostras cortadas com as fibras musculares paralelamente à direção da fibra é um fator adicional a favor deste corte de porção culinária, o que pode favorecer a textura na avaliação sensorial (SZMAŃKO et al., 2021).

As proteínas específicas desnaturam à diferentes temperaturas durante o aquecimento, alterando gradativamente a textura da carne cozida. A influência da temperatura de assamento sobre a força de cisalhamento é grande, pois os valores aumentam com a evolução da temperatura. Este fato é ocasionado pela elevação da rigidez da estrutura miofibrilar produzida pela desnaturação das proteínas miofibrilares associado à perda de água na carne (CHRISTENSEN; PURSLOW; LARSEN, 2000; BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014). O aumento da resistência da carne aumenta em duas fases distintas durante o cozimento. A primeira fase do endurecimento ocorre entre 40-50 °C ocasionado por mudanças nas propriedades mecânicas do tecido conjuntivo. Estas mudanças são atribuídas à desnaturação da miosina (BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014) e, alternativamente, ao aumento da força do perimísio (CHRISTENSEN; PURSLOW; LARSEN, 2000), possivelmente devido a um aumento na concentração de fibras de colágeno em uma determinada seção transversal, à

medida que a desnaturação altera a estrutura terciária (PURSLOW, 2014a). Na segunda fase do endurecimento, entre 60-80°C, ocorre o aumento da resistência promovido pelo aumento da força do componente miofibrilar, causado pelo aumento da ruptura das fibras musculares individuais, ao mesmo tempo em que ocorre a desnaturação da actina e das proteínas sarcoplasmáticas (CHRISTENSEN; PURSLOW; LARSEN, 2000; TORNBERG, 2005; BEJERHOLM; TØRNGREN; AASLYNG, 2014).

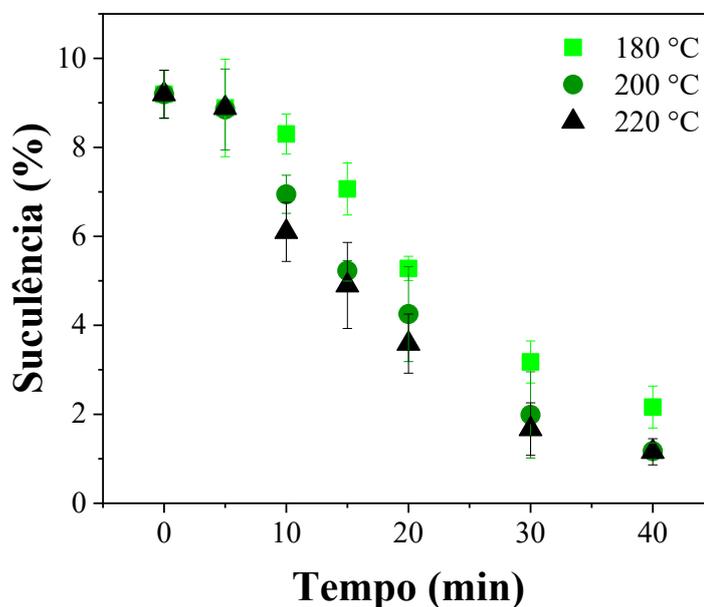
O período de amaciamento entre 50-60 °C foi associado ao início da solubilização do colágeno, que causa a redução da força de cisalhamento (CHRISTENSEN; PURSLOW; LARSEN, 2000), mas é dependente do tempo e temperatura do cozimento, que por sua vez afetam a proporção e grau de solubilidade do colágeno na carne. Além disso, uma vez que o *M. longissimus dorsi* suíno contém baixo conteúdo de colágeno (tecido conjuntivo) ((VOUTILA et al., 2007b), pode-se afirmar que os valores de força de cisalhamento são influenciados diretamente pela desnaturação das proteínas miofibrilares (principalmente o complexo actomiosina) (CHIAVARO et al., 2009). De maneira simplificada, a relação das proteínas miofibrilares com a maciez de lombo suíno assado é basicamente o resultado da sua capacidade de retenção de água e do encurtamento do sarcômero, através da formação de complexos de actomiosina, como resultado do encolhimento pelo calor.

4.3.5.2 Suculência

A Figura 31 mostra a redução da suculência com a evolução do assamento em diferentes temperaturas. Inicialmente a suculência de lombo suíno cru foi de $9,19 \pm 0,54$ % ao atingir a temperatura interna de 75 °C, as suculências foram reduzidas para $5,28 \pm 0,27$, $5,22 \pm 0,23$ e $4,90 \pm 0,97$ % para as temperaturas de 180, 200 e 220 °C, respectivamente, sem diferenças significativas ($p < 0,05$) entre elas. Com o avanço do assamento (40 min), a suculência foi reduzida para $2,16 \pm 0,47$, $1,17 \pm 0,19$ e $1,16 \pm 0,29$ %, para temperaturas de assamento de 180, 200 e 220 °C, respectivamente. A suculência de lombo suíno assado a 180 °C foi significativamente maior ($p < 0,05$) em relação ao observado para as amostras assadas a 200 e 220 °C. Portanto, o aumento do tempo e da temperatura de assamento resultaram em menores valores de suculência (mais líquido liberado quando prensado), indicando que o lombo suíno continha menos líquido exsudado para percepção sensorial durante a sua degustação. MCKILLIP *et al.* (2017) relataram valores de suculência de lombo bovino (*M. longissimus dorsi*) grelhado iguais a 23,68, 20,38 e 16,20 % (líquido prensado liberado) para temperaturas de ponto final iguais a 60, 71 e 82 °C, respectivamente. Em outro estudo, o autor relata valores de

suculência de 24,34, 21,15 e 15,37 %, para os mesmos graus de cozimento (MCKILLIP *et al.*, 2017).

Figura 31 – Suculência durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Publicações científicas sobre a determinação instrumental da suculência de lombo suíno assado são limitadas na literatura, dificultando comparações com os resultados obtidos no presente estudo. Este fato é justificado pela complexidade de associação desses dados aos escores de suculência de painéis sensoriais, metodologia clássica de avaliação dessa propriedade (LUCHERK *et al.*, 2017; RAMOS; GOMIDE, 2017). Segundo Lucherck *et al.* (2017), o líquido liberado durante a compressão controlada da carne pode ser correlacionado com a suculência da amostra ou com a capacidade de retenção de água. Este fato é confirmado quando observamos o comportamento dos dados de suculência (líquido liberado) em função da temperatura do centro (perfil sigmoidal) (Figura 37c) e da umidade global (perfil linear) (Figura 38c). Em especial, a suculência em função da umidade global apresentou comportamento linear, com excelente parâmetro de ajuste ($R^2 = 0,98$ e $RMSE = 1,39$), além da forte correlação positiva ($r = 0,93$) ($p < 0,001$) (Figura 39). Aaslyng *et al.* (2003) afirmam que a suculência de lombo suíno assado é favorecida em temperaturas mais baixas e é aumentada durante as primeiras 10 mastigações. Além disso, a suculência apresentou relação direta com a qualidade inicial da carne e a perda por cozimento. Bejerholm e Aaslyng (2004) demonstraram que menores temperaturas do forno proporcionam carnes assadas mais suculentas em comparação com aquelas assadas em temperaturas mais altas, com a mesma temperatura central final. Além

disso, o aumento da temperatura central da carne diminui a suculência determinada sensorialmente (HEYMANN et al., 1990; BEJERHOLM; AASLYNG, 2004).

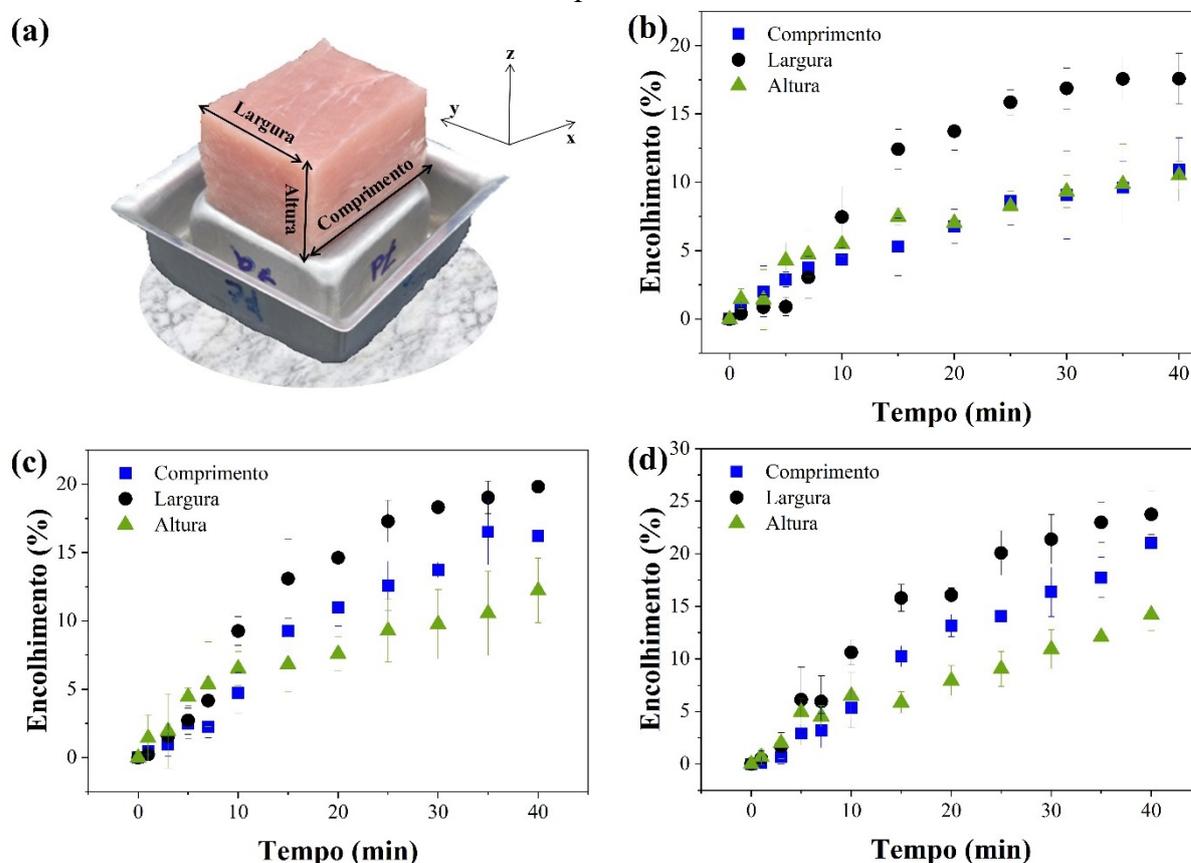
O aquecimento da carne durante o assamento favorece a perda água à medida que o tempo e a temperatura aumentam. É de se esperar que a suculência tenha relação direta com a capacidade de retenção de água da carne (Figura 26). A desnaturação das proteínas causa mudanças estruturais nas membranas celulares das fibras musculares, além do encolhimento das fibras musculares e do tecido conjuntivo, resultando em perda de umidade (HONIKEL, 1987; LUCHERK et al., 2017). O encolhimento longitudinal intensificado a 65 °C exerce uma pressão sobre a água nas miofibrilas, que é expelida pelos canais (poros longitudinais entre as fibras) da estrutura da carne, podendo explicar a perda de suculência com o aumento da temperatura (OFFER et al., 1989; TORNBERG, 2005).

4.3.6 Encolhimento de lombo suíno assado

4.3.6.1 Dimensões

A Figura 32 ilustra o encolhimento das dimensões do lombo suíno assado. As Figuras 32a, 32b e 32c ilustram o encolhimento do comprimento, largura e altura das amostras cuboides de lombo suíno durante o processo de assamento a 180, 200 e 220 °C, respectivamente. O encolhimento das amostras de lombo suíno aumentou com o tempo e com a temperatura utilizada no assamento. As três dimensões das amostras foram reduzidas durante o assamento. A largura foi a mais afetada, seguida pelo comprimento e altura da amostra (Figura 32d). O encolhimento do comprimento foi de $10,94 \pm 2,31$, $16,20 \pm 0,34$ e $21,06 \pm 0,77$ % para lombo suíno assado a 180, 200 e 220 °C, respectivamente. Para a largura das amostras, o encolhimento foi de $17,58 \pm 1,86$, $19,82 \pm 0,36$ e $23,76 \pm 2,18$ %, respectivamente para as mesmas condições de temperatura. A altura das amostras foi reduzida $10,51 \pm 1,04$, $12,23 \pm 2,36$ e $14,22 \pm 1,51$ % em 180, 200 e 220 °C, respectivamente.

Figura 32 - Encolhimento das dimensões de lombo suíno em função do tempo de assamento a (a) 180, (b) 200 e (c) 220 °C; (d) encolhimento após 40 min de assamento em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Feyissa et al. (2013) avaliaram o encolhimento em lombo suíno assado em 3 dimensões durante o processo de assamento, identificando diferentes fenômenos de encolhimento, os quais possuem diferentes efeitos no transporte de água durante o assamento. A taxa de encolhimento é acentuada durante a parte inicial e intermediária do processo de assamento. Após essas fases, a taxa de encolhimento é reduzida, justificada pelo aumento do módulo de elasticidade da carne quando a carne é aquecida acima de 65 °C (TORNBERG, 2005; FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009). O encolhimento identificado ocorreu nas direções de comprimento e da largura, sendo mais pronunciado no comprimento da amostra. Avaliando as cinéticas de encolhimento e de perdas de massa, verificou-se que a retração é a base para maiores perdas de água. Uma observação destacada pelos autores foi que a perda de massa é maior quando a amostra encolhe em todas as direções em comparação à situação em que ocorre a expansão em uma de suas direções. Este fato é justificado pelo maior estresse sofrido pela amostra encolhida em todas as direções. Uma pressão de compressão maior resulta em fluxo de água líquida para a superfície da peça, e levando a maiores perdas de massa (FEYISSA; ADLER-NISSEN;

GERNAEY, 2009). As variações no comportamento do encolhimento entre amostras de carne assada não possuem justificativa identificada. Contudo, deve-se relacionar a variabilidade biológica e evitar a comparação entre músculos diferentes (TORNBORG, 2005; FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009; WARNER et al., 2017).

Os dados experimentais de encolhimento das dimensões de lombo suíno assado obtidos através de paquímetro são interessantes e válidos para a literatura. Em contrapartida, sabe-se que não é adequado executar o cálculo de volume aparente reconstruindo a forma original da carne partindo destes dados. Este fato é justificado pela metodologia assumir que a amostra possui forma regular e não captura as mudanças irregulares no domínio da forma da carne ao longo do cozimento (DU; SUN, 2005; FEYISSA; ADLER-NISSEN; GERNAEY, 2009; SZMAŃKO et al., 2021). Dessa forma, outros métodos convencionais como análise de vídeo ou imagem (BARBERA; TASSONE, 2006), deslocamento de líquido (SZMAŃKO et al., 2021) ou pela força de empuxo (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980) podem ser aplicados ao estimar o encolhimento do volume da carne com o cozimento.

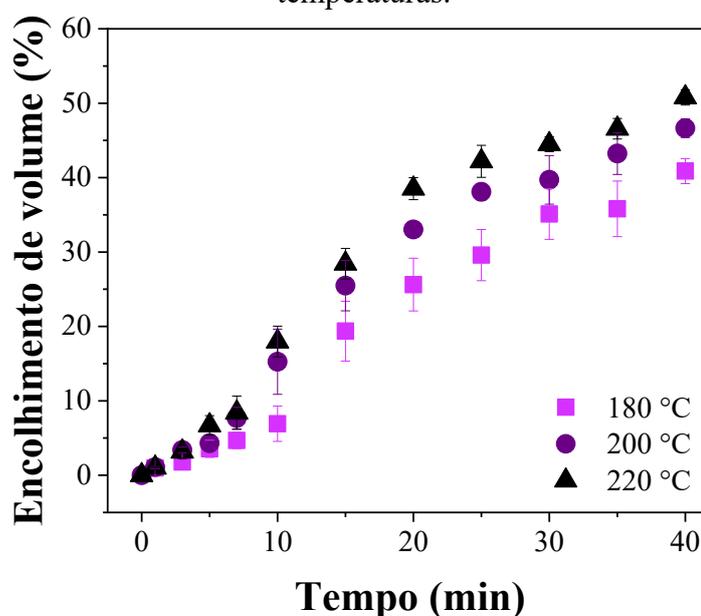
4.3.6.2 *Encolhimento de volume*

O encolhimento de volume de lombo suíno assado deve considerar a amostra como tridimensional para poder capturar as mudanças irregulares da forma com o cozimento. Como alternativa, os dados de encolhimento de volume apresentados na Figura 33 foram medidos pela força de empuxo da amostra imersa em solvente. O método tem boa precisão e exatidão para a determinação do encolhimento na carne cozida (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980; YAN; SOUSA-GALLAGHER; OLIVEIRA, 2008; SA-ADCHOM et al., 2011).

A Figura 33 mostra o aumento do encolhimento de volume de lombo suíno com a evolução do assamento em diferentes temperaturas. As amostras de carne assadas por 40 min em temperaturas de 180, 200 e 220 °C apresentaram encolhimentos de $40,64 \pm 2,08$, $46,89 \pm 1,59$ e $50,54 \pm 0,45$ %, respectivamente. Para comparação com a literatura, os encolhimentos de amostras de lombo suíno assados a 180, 200 e 220 °C foram determinados quando suas temperaturas internas atingiram 75 °C. Os valores de encolhimento volumétrico foram de $25,25 \pm 4,38$ (180 °C), $25,17 \pm 4,01$ (200 °C) e $28,59 \pm 2,39$ (220 °C). Resultados semelhantes foram encontrados na literatura utilizando outras metodologias para a determinação do volume aparente (BARBERA; TASSONE, 2006; SZMAŃKO et al., 2021). Hambúrguer de *longissimus dorsi* suíno apresentou encolhimento de 22,27 % de sua área de superfície inicial (1 cm de espessura e 5,5 cm de diâmetro, área inicial de 23,7 cm²) após ser assado a 165 °C por

10 min (temperatura interna de 70 °C). A metodologia utilizada baseou-se na diferença entre a área crua e cozida da amostra obtida por análise de imagem de vídeo e expressa em porcentagem da área crua (BARBERA; TASSONE, 2006).

Figura 33 – Encolhimento de volume durante o assamento de lombo suíno em diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Szmanko et al (2021) avaliou o efeito do método de corte da amostra em fibras musculares paralelas e diagonais sobre o volume aparente de lombo suíno assado (até atingir temperatura interna de 72 °C) utilizando o método de deslocamento de água. Como resultado, a redução no volume das amostras com fibras na diagonal assadas a 125 e 150°C foram de 28,62 e 27,90%, respectivamente. Nas mesmas temperaturas, as amostras com fibras paralelas apresentaram reduções menores de 24,66 e 24,16 %, respectivamente. Além disso, houve maior número de fibras de carne na seção transversal do lombo suíno assado em comparação a fibras diagonais (SZMAŃKO et al., 2021). Quanto à microestrutura, com o aumento da temperatura de assamento, as amostras com fibras na diagonal apresentaram contração intensa do perimísio. Isso contribuiu para a redução dos espaços livres ao redor das fibras musculares, favorecendo a compressão das fibras em feixes e drenagem do suco muscular para fora das fibras musculares, resultando em maiores encolhimentos e perdas por cozimento (SZMAŃKO et al., 2021).

O aquecimento da carne no cozimento induz ao encolhimento multidimensional, resultando em irregularidades e deformação da superfície (ZHENG; SUN; ZHENG, 2007). O encolhimento geralmente é anisotrópico, ou seja, diferentes alterações dimensionais em

diferentes direções. Essa anisotropia é dependente das condições de cozimento e ainda não é bem explicada pelos modelos de mudanças físicas no cozimento da carne atualmente aceitos (PURSLOW et al., 2016). Contudo, sabe-se o encolhimento anisotrópico é atribuído à orientação das fibras musculares na carne (SZMAŃKO et al., 2021), à distribuição variável de ligações cruzadas de colágeno (TORNERBERG, 2005; VASKOSKA et al., 2020) e pela formação e tamanho dos canais que expõem água na rede do tecido conjuntivo (KONDJAYAN et al., 2013; SZMAŃKO et al., 2021).

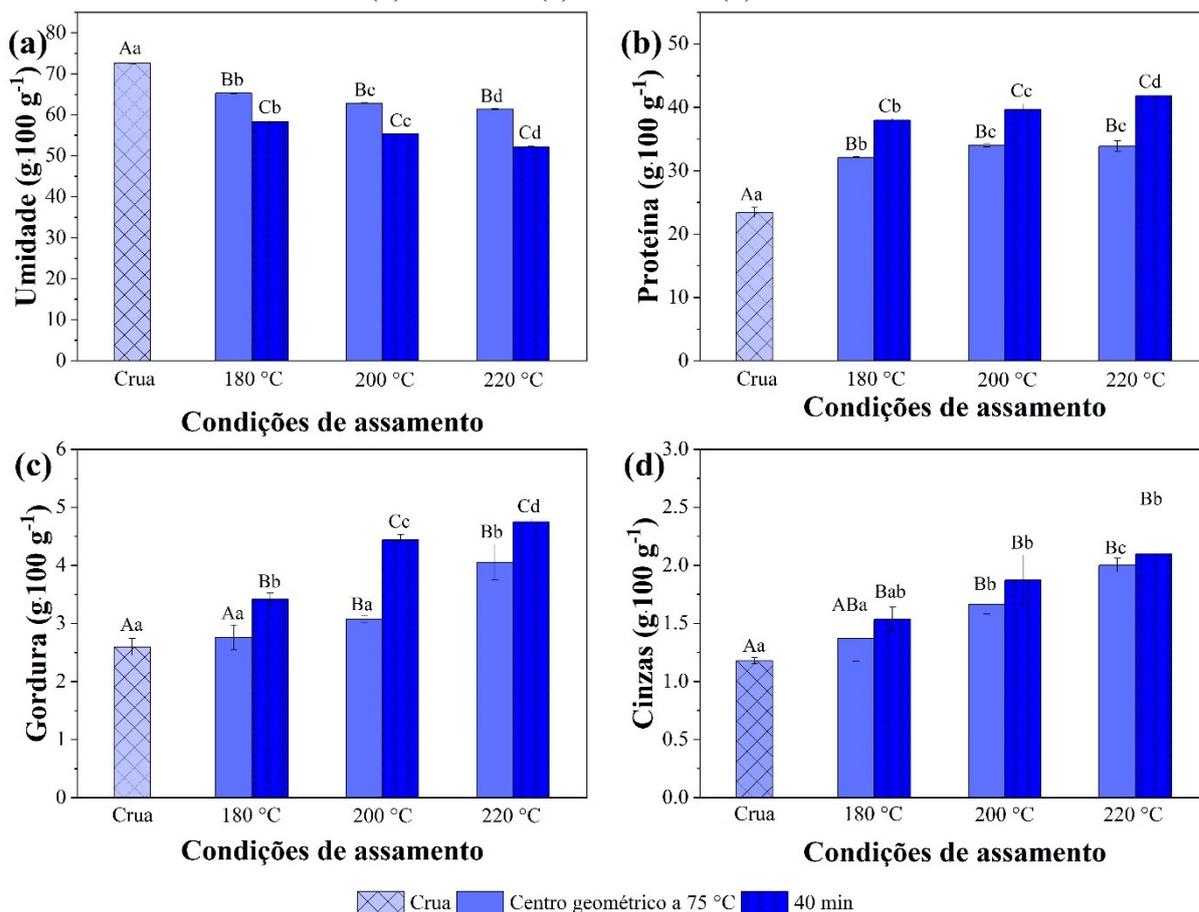
O encolhimento das proteínas da carne ocorre em diferentes temperaturas durante o cozimento. O encolhimento transversal mais significativo ao eixo da fibra ocorre de 40 a 60 °C e torna o tecido muscular mais poroso, pelo aumento dos espaços extracelulares entre as fibras e o endomísio. O encolhimento do tecido conjuntivo começa em 60 °C e se intensifica após 65 °C, favorecendo o encolhimento longitudinal do tecido conjuntivo e das fibras musculares (BOUTON; HARRIS; SHORTHORSE, 1976; OFFER et al., 1989; OFFER; COUSINS, 1992; TORNERBERG, 2005). A diminuição do comprimento do sarcômero exerce uma pressão sobre a água nas miofibrilas, que é expelida pelos canais da estrutura da carne, favorecendo o encolhimento longitudinal e a perda de suculência da carne (OFFER et al., 1989; TORNERBERG, 2005).

4.3.7 Composição centesimal

A contribuição e as proporções dos componentes químicos básicos no lombo suíno determinam não apenas o seu valor nutricional, mas também a aceitação pelo consumidor. A Figura 34 apresenta a composição centesimal em base úmida do lombo suíno cru e assado em função do tempo e da temperatura de assamento. O lombo suíno cru foi usado como referência na análise estatística para avaliar o efeito do tempo (letras maiúsculas) e da temperatura de assamento (letras minúsculas) sobre a composição centesimal. O lombo suíno (*Longissimus dorsi*) é um músculo considerado magro e apresentou a seguinte composição (em g·100 g): umidade: $72,57 \pm 0,14$ g·100 g⁻¹, proteína: $23,45 \pm 0,78$ g·100 g⁻¹, gordura: $2,60 \pm 0,12$ g·100 g⁻¹ e minerais: $1,18 \pm 0,03$ g·100 g⁻¹, semelhantes aos encontrados na literatura (BECKER et al., 2016; DUMA-KOCAN et al., 2019; GAFFIELD et al., 2020). A relação umidade/proteína/gordura de 73,98/21,43/3,09 % foi publicada para *Longissimus dorsi* de javalis (DUMA-KOCAN et al., 2019), enquanto a relação umidade/proteína/gordura/cinzas de 73,2/23,5/2,5/1,15 % para lombo suíno (*longissimus thoracis et lumborum*) (BECKER et al.,

2016). O teor de gordura intramuscular de lombo suíno cru ($2,60 \pm 0,12 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) foi $\leq 3\%$, sendo classificado como lombo com baixo marmoreio (GAFFIELD et al., 2020).

Figura 34 - Composição centesimal em base úmida de lombo suíno cru (▨) e assado a (■) centro geométrico a 75 °C e (■) 40 min nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C: (a) Umidade; (b) Proteína; (c) Gordura e (d) Cinzas.



g·100 g⁻¹ – gramas de componente por 100 gramas de amostra assada úmida. As barras de erro representam \pm o desvio padrão, n = 3. ^A Médias com a mesma letra maiúscula não são significativamente diferentes ($p < 0,05$; análise realizada entre amostra crua e amostras assadas em mesma temperatura). ^a Médias com a mesma letra minúscula não são significativamente diferentes ($p < 0,05$; análise realizada entre amostra crua e amostras assadas em mesmo tempo). Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Figura 34a mostra que o teor de umidade de lombo suíno cru é significativamente ($p < 0,05$) diferente do lombo suíno após o assamento. O teor de umidade de carne assada diminuiu significativamente ($p < 0,05$) com o tempo e temperatura de assamento, concordando com os resultados já apresentados na Figura 17a. Proteínas são desnaturadas quando a carne é aquecida, e as proteínas solúveis tornam-se insolúveis, enquanto o teor de umidade é reduzido, razão pela qual a carne crua tem teor de umidade maior do que a carne assada (MACHARÁČKOVÁ et al., 2021). A perda de umidade que ocorre no assamento aumenta as concentrações relativas de proteína, gordura e cinzas, como observado nas Figuras 34b, 34c e 34d, respectivamente. De

uma maneira geral, tempos mais longos e temperaturas mais altas aumentaram significativamente ($p < 0,05$) a concentração dos macronutrientes em lombo suíno assado. Resultados semelhantes foram publicados por Delgado-Andrade et al (2010) que avaliaram lombo suíno salgado e assado a 200 °C por 20 min, que observaram uma relação de umidade/proteína/gordura/cinzas de 59,3/31,1/8,9/3,5 g·100 g⁻¹. Heyman et al (1990) observaram redução de umidade de 66,0 a 61,9 %, aumento da concentração de proteína de 27,5 para 30,3 % e de lipídios extraíveis de 6,3 a 7,7 %, com o aumento da temperatura central final de 65 para 82 °C, em lombo suíno assado a 163 °C. Duma-Kocan et al. (2019) não encontraram diferenças significativas na composição centesimal de peças de lombo de javalis assados em temperaturas de 150-175 °C e 175-200 °C, eles observaram relações de umidade/proteína/gordura de 67,36/20,90/8,08 e 66,91/21,00/8,72 %, para as duas condições de assamento de 150-175 °C e 175-200 °C, respectivamente.

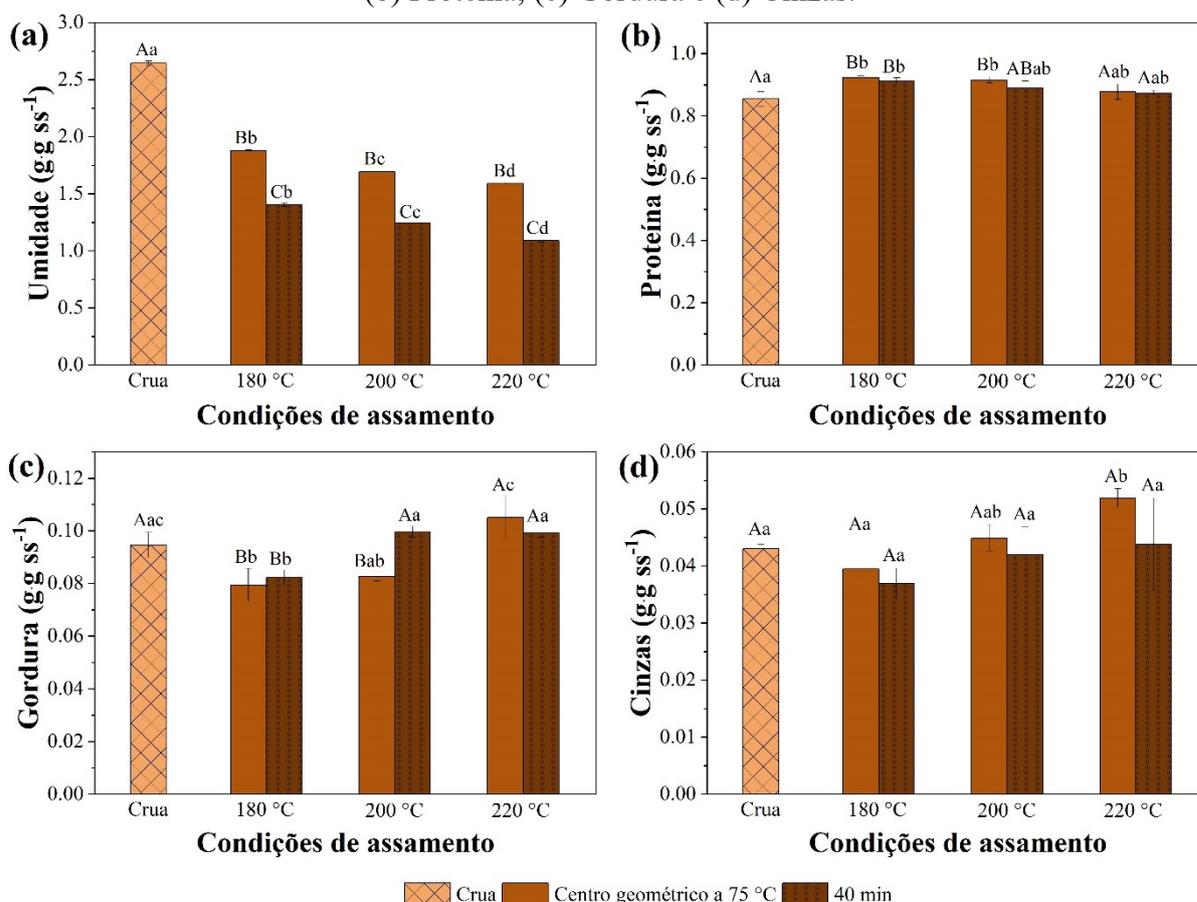
A perda de água em lombo suíno assado variou de 7,29 a 20,41 g·100 g⁻¹ nas condições de assamento avaliadas. Como consequência, ocorreu a concentração de proteínas de 8,61 e 18,36 g·100 g⁻¹, gorduras de 0,16 e 2,15 g·100 g⁻¹ e cinzas de 0,19 e 0,92 g·100 g⁻¹ em amostras de lombo suíno assadas por 20 min a 180 °C e por 40 min a 220 °C. Estes resultados são próximos do relatado pela literatura para lombo suíno grelhado a 200 °C, com 28 % de perdas por cozimento e concentração de proteínas e gorduras de 7,77 e 3,11 %, respectivamente (MACHARÁČKOVÁ et al., 2021). O tempo e a temperatura de assamento são críticos para a formação das características de qualidade da carne assada e impactam significativamente na composição centesimal de lombo suíno assado. Resultados sobre o efeito das condições de processo sobre a composição centesimal da carne assada são raros na literatura.

As concentrações relativas de componentes na carne assada são aumentadas no processo de assamento, devido às perdas de umidade durante o assamento. Dessa forma, analisar a composição centesimal em base seca garante que os macronutrientes estejam na mesma base para avaliar os efeitos do cozimento. A análise da composição em base seca desengordurada também foi realizada para aumentar a sensibilidade da detecção das perdas de sólidos solúveis no cozimento. Contudo, não houve diferenças significativas entre os dados encontrados para a composição centesimal em base seca e em base seca desengordurada.

A Figura 35 apresenta a composição centesimal em base seca do lombo suíno cru e assado em função do tempo e da temperatura de assamento. O lombo suíno cru foi usado novamente como referência na análise estatística para avaliar o efeito do tempo (letras maiúsculas) e da temperatura de assamento (letras minúsculas) sobre a composição centesimal em base seca. Pode-se afirmar que a perda de umidade (Figura 35a) predomina

significativamente ($p < 0,05$) entre as perdas por cozimento de lombo suíno assado. Nenhuma perda significativa ($p < 0,05$) de proteína (Figura 35b) e cinzas (Figura 35d) foi detectada durante o assamento nos tempos e temperaturas avaliados. Quanto à gordura (Figura 35c), houve pequenas reduções ($p < 0,05$) em relação à carne crua quando as amostras foram assadas em condições brandas de processo (20 e 40 min a 180 °C e 20 min a 200 °C). As diferenças estatísticas identificadas para proteína e gordura (20 e 40 min a 180 °C e 20 min a 200 °C) e cinzas (20 min a 220 °C) podem ser explicadas pela variabilidade natural da matéria-prima, sendo que foram utilizadas mais de uma peça de lombo suíno no preparo das amostras utilizadas. Ainda, maiores teores de proteína em amostras de carne com menos gordura foram observadas em estudo anterior (RHEE; GRIFFITH-BRADLE; ZIPRIN, 1993).

Figura 35 - Composição centesimal em base seca de lombo suíno cru (■) e assado por (■) centro geométrico a 75 °C e (■) 40 min nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C: (a) Umidade; (b) Proteína; (c) Gordura e (d) Cinzas.

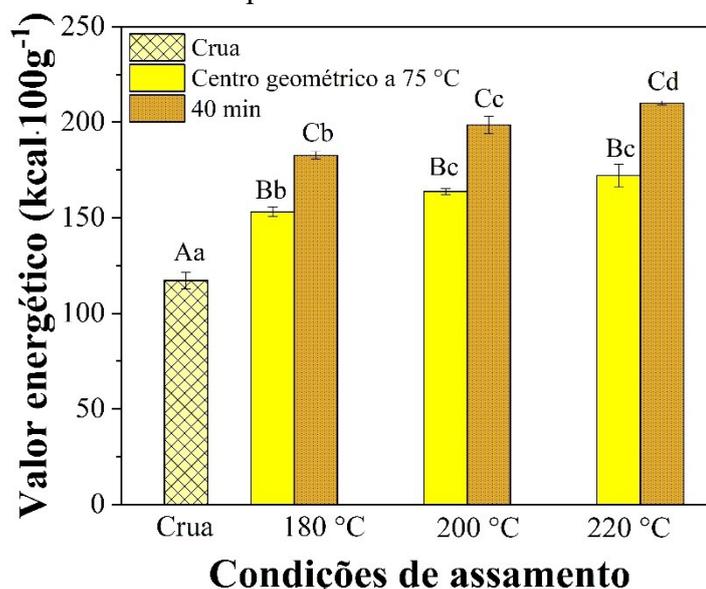


g·g⁻¹ – gramas de componente por gramas de amostra assada seca. As barras de erro representam \pm o desvio padrão, $n = 3$. ^AMédias com a mesma letra maiúscula não são significativamente diferentes ($p < 0,05$; análise realizada entre amostra crua e amostras assadas em mesma temperatura). ^aMédias com a mesma letra minúscula não são significativamente diferentes ($p < 0,05$; análise realizada entre amostra crua e amostras assadas em mesmo tempo). Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Assim, é possível desconsiderar a presença de proteínas, gordura e cinzas ($p < 0,05$) nos sólidos solúveis perdidos durante o assamento (Figura 29b). Por outro lado, há perdas de minerais do lombo suíno durante o assamento. Goran et al. (2016) observou reduções significativas de Na (sódio) e Mg (magnésio) em lombo suíno assado, sugerindo que esses minerais são lixiviados nos líquidos perdidos durante o assamento. O teor médio de Fe (ferro) se manteve constante, mas os teores de Zn (zinco) e K (potássio) aumentaram após o assamento ($\text{g}\cdot 100 \text{ g}$). A literatura também relata resultados de lombo suíno grelhado por 5 min a $200 \text{ }^\circ\text{C}$, em que foram encontradas reduções de Na, K, Fe, Zn, Cu, Mg e Ca (MACHARÁČKOVÁ et al., 2021). Goran et al. (2016) afirmam que o processo de assamento é responsável por menores perdas de minerais quando comparado a outros métodos de cozimento. Dessa forma, assar pode ser o método mais eficaz de cozimento de lombo suíno para manter o valor nutricional mineral deste alimento (BOGNÁR, 1998; GORAN et al., 2016).

A Figura 36 ilustra o valor energético de lombo suíno cru e assado em função do tempo e temperatura de assamento. O valor energético aumentou significativamente ($p < 0,05$) com o aumento de tempo de temperatura de assamento. O teor de energia do lombo suíno cru foi de $119,25 \pm 3,55 \text{ kcal}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$, valor geralmente encontrado em cárneos com baixo teor de gordura (LIMA et al., 2011). Após o assamento, o teor de energia disponível no lombo suíno aumentou de $154,30 \pm 1,98$ a $210,49 \pm 1,03$ entre o assamento a $180 \text{ }^\circ\text{C}$ por 20 min e a $220 \text{ }^\circ\text{C}$ por 40 min. De acordo com a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA), o lombo suíno cru apresenta um valor energético de 176 kcal e assado de 210 kcal (LIMA *et al.*, 2011), valores superiores aos encontrados neste trabalho. Por outro lado, valores energéticos semelhantes foram encontrados para lombo suíno ($227 \text{ kcal}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$) quando assado a $93 \text{ }^\circ\text{C}$ por 5 horas até a temperatura interna atingir $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (ROURKE et al., 1992) e $177,46 \text{ kcal}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ para lombo suíno assado a $179 \text{ }^\circ\text{C}$ até a temperatura interna atingir $71 \text{ }^\circ\text{C}$ (MORGAN; CALKINS; MANDIGO, 1988). Delgado-Andrade et al. (2010) avaliaram o assamento de lombo suíno salgado por 20 min a $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e relataram um valor de $233 \text{ kcal}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$. As informações de valor energético e aspectos nutricionais de lombo suíno são limitadas na literatura, principalmente para lombo suíno assado em condições de assamento controladas. Dessa forma, o presente trabalho preenche uma importante lacuna na literatura.

Figura 36 – Resultados experimentais de valor energético ($\text{kcal}\cdot 100\text{g}^{-1}$) em função do tempo e temperatura de assamento.



^A Médias com a mesma letra maiúscula não são significativamente diferentes ($p < 0,05$; análise realizada entre amostra crua e amostras assadas em mesma temperatura). ^a Médias com a mesma letra minúscula não são significativamente diferentes ($p < 0,05$; análise realizada entre amostra crua e amostras assadas em mesmo tempo). Fonte: Elaborado pela autora (2022).

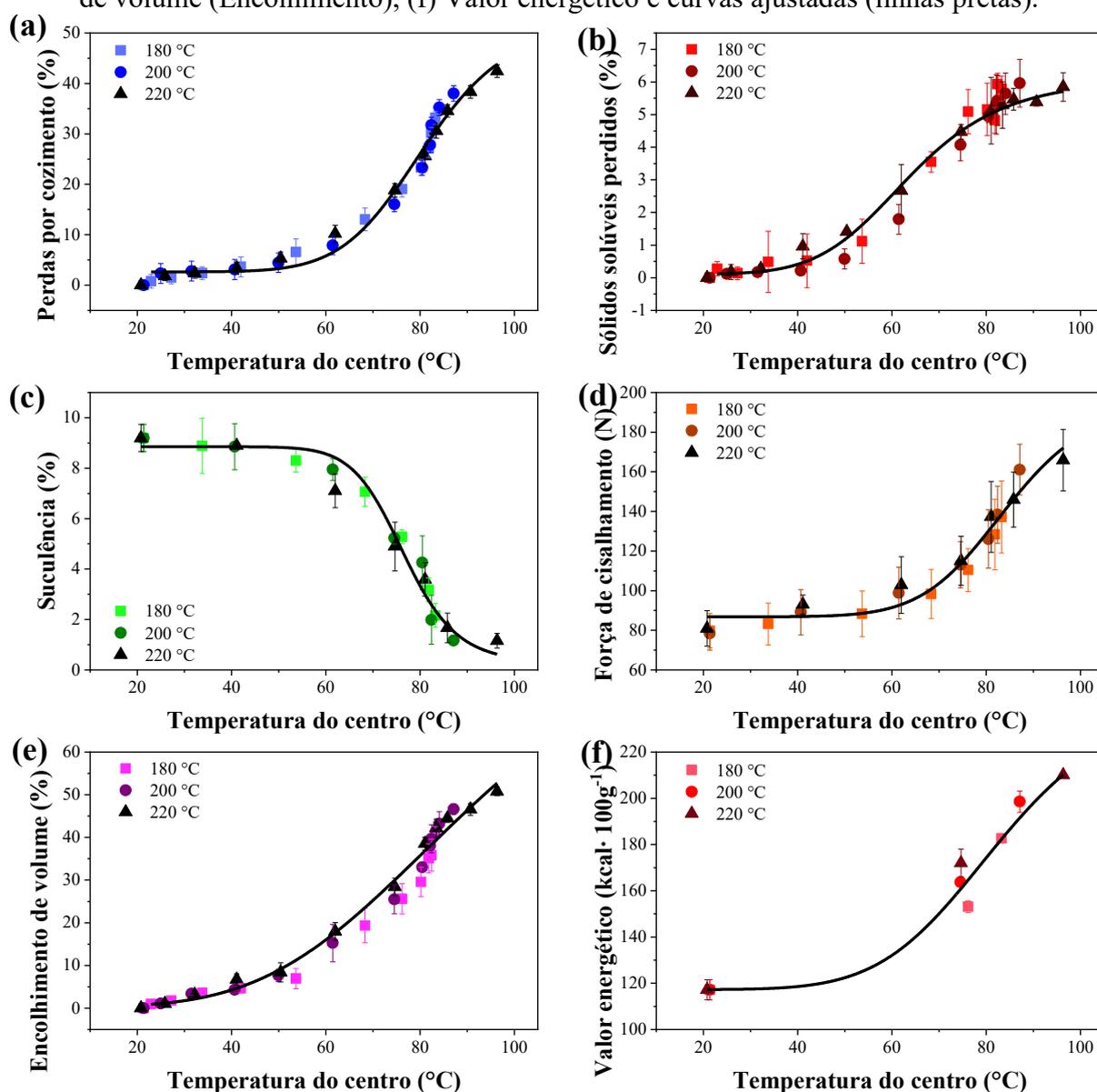
4.3.8 Modelagem matemática das propriedades físicas de lombo suíno assado

A Figura 37 apresenta resultados das perdas por cozimento (Figura 37a), perdas de sólidos solúveis (Figura 37b), suculência (Figura 37c), força de cisalhamento (Figura 37d), encolhimento de volume (Figura 37e) e valor energético (Figura 37f) durante o assamento a diferentes temperaturas. Nessas figuras também são apresentadas equações sigmóides ajustadas aos diferentes resultados experimentais em função da temperatura do centro das amostras. Todos os perfis das propriedades físicas em função grau de cozimento apresentaram comportamento sigmóide. Durante o assamento de lombo suíno em temperatura controlada, as perdas por cozimento, perdas de sólidos solúveis, força de cisalhamento e o encolhimento de volume têm início a aproximadamente 30 °C, aumentam rapidamente entre 50 e 85 °C, e continuam a aumentar lentamente, à medida que a carne é assada. Para o mesmo tempo e grau de cozimento, a suculência reduziu com o aumento da temperatura do centro. A taxa de desnaturação de proteínas variou com as taxas de aquecimento observadas durante o processo de assamento, resultando em diferentes alterações estruturais das amostras de lombo suíno carne (HEYMANN et al., 1990).

Ambas as perdas aumentam à medida que a temperatura final no centro aumenta em comportamento sigmóide. As perdas globais por cozimento em função da temperatura central

final têm sido abordadas na literatura (HEYMANN et al., 1990; CRAWFORD et al., 2010; PÖLDVERE et al., 2016; WANG et al., 2019). Contudo, poucos resultados de perdas globais por cozimento e da perda de sólidos solúveis durante o assamento de lombo suíno têm sido publicados na literatura. A correlação entre a perda por cozimento e o tempo de cozimento não é linear, pois depende da taxa de aquecimento da amostra e de complexos processos de transferência de calor e massa no interior da amostra (VITTADINI et al., 2005; CHIAVARO et al., 2009).

Figura 37 - Relação entre a temperatura do centro e (a) perdas por cozimento (PC), (b) perdas de sólidos solúveis (SSP), (c) Suculência, (d) Força de cisalhamento (FCis), (e) Encolhimento de volume (Encolhimento), (f) Valor energético e curvas ajustadas (linhas pretas).



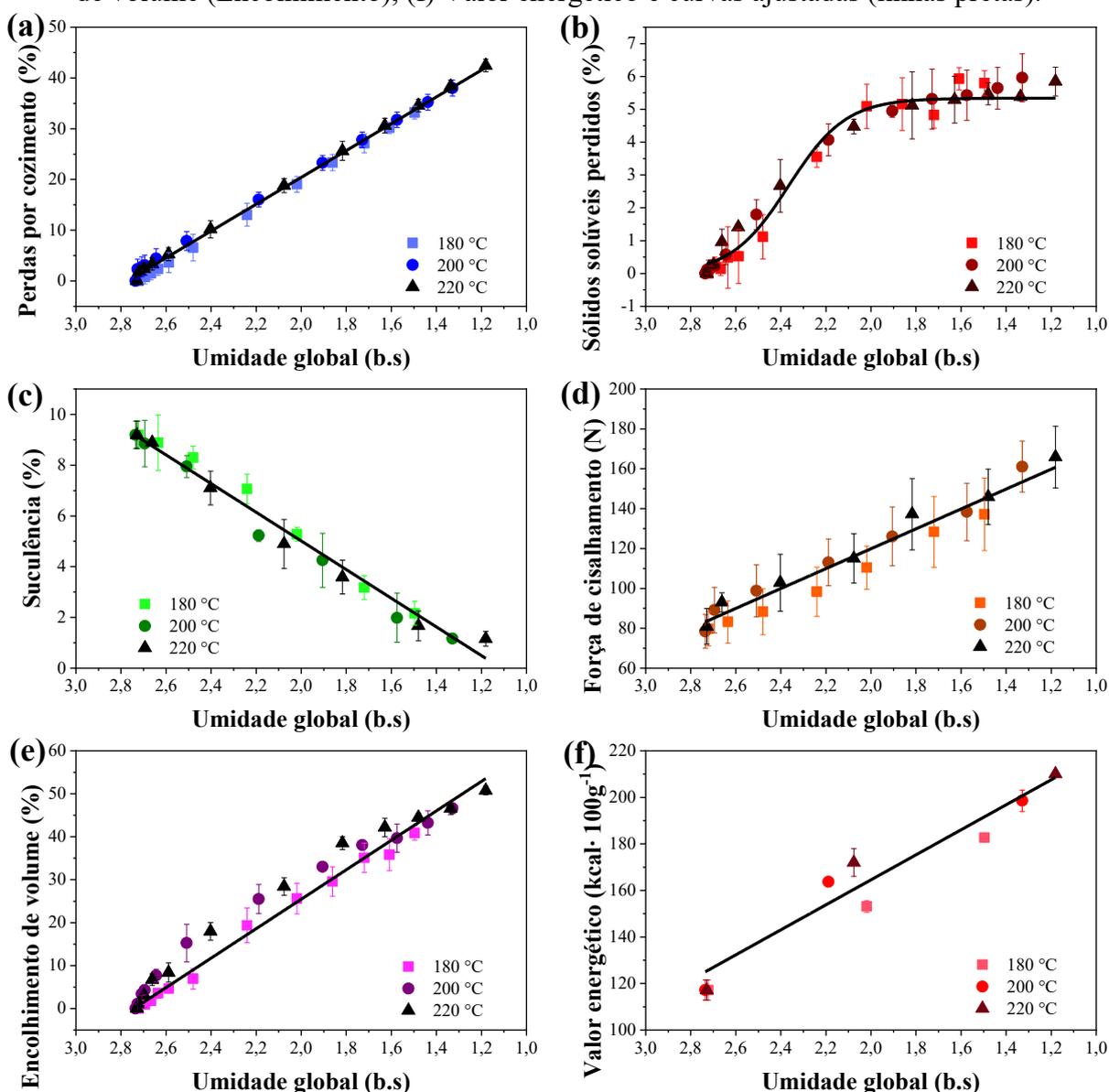
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Resultados publicados na literatura mostram que as perdas aumentam com o grau de cozimento, o que reduz a sensação de suculência de lombo suíno assado (AASLYNG et al., 2003). O encolhimento de lombo suíno assado, sua suculência e maciez resultam do grau de cozimento e de uma combinação de fatores intrínsecos dependentes da quantidade de colágeno e do grau de desnaturação das proteínas miofibrilares, que influencia na perda de água. Durante a desnaturação térmica das proteínas da carne, ocorrem mudanças estruturais, como i) agregação e formação de gel pelas proteínas sarcoplasmáticas, ii) destruição de membranas, iii) encolhimento transversal e longitudinal das fibras musculares e iv) encolhimento e solubilização das fibras de colágeno. Dessa forma, o encolhimento desfavorece a retenção de água na estrutura de carne cozida, e, conseqüentemente, reduz a maciez e suculência do lombo suíno assado (TORNERG, 2005; RAMOS; GOMIDE, 2017).

A Figura 38 representa os resultados das perdas por cozimento (Figura 38a), perdas de sólidos solúveis (Figura 38b), suculência (Figura 38c), força de cisalhamento (Figura 38d), encolhimento de volume (Figura 38e) e valor energético (Figura 38f) durante o assamento a diferentes temperaturas. Os ajustes dos dados experimentais por equações lineares e sigmoidal, em função da umidade global, também são apresentados (Figura 38b). O perfil representando a perda de sólidos solúveis em função da umidade global foi sigmoidal, indicando o aumento das perdas com a redução da umidade global. Como esperado, as perdas por cozimento têm uma relação linear com a umidade global nas amostras durante o assamento, indicando que os experimentos foram reprodutíveis, e que há consistência nos resultados. Além disso, os perfis de suculência, força de cisalhamento e encolhimento também apresentaram relação linear com a umidade global de lombo suíno assado. Esses resultados mostram que a realização de experimentos de assamento com controle rigoroso da temperatura da cavidade são cruciais para representar as variáveis do processo de assamento de lombo suíno por modelos matemáticos precisos.

A CRA tem relação direta com todas as propriedades físico-químicas do lombo suíno assado. Quando a carne possui alta CRA, as perdas no cozimento são menores e o encolhimento é menor, garantindo uma carne mais macia e suculenta (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013; HUGHES et al., 2014; PURCHAS, 2014; WARNER, 2014). Dessa forma, é essencial favorecer a permanência de água na estrutura da carne durante o assamento, por meio da combinação de tempo, temperatura, taxa de aquecimento e temperatura final das amostras.

Figura 38 - Relação entre a umidade global e (a) perdas por cozimento (PC), (b) perdas de sólidos solúveis (SSP), (c) Suculência, (d) Força de cisalhamento (FCis) e (e) Encolhimento de volume (Encolhimento), (f) Valor energético e curvas ajustadas (linhas pretas).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Tabela 4 apresenta as estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados às propriedades físicas em função da temperatura do centro e da umidade global de lombo suíno assado. Os modelos sigmóides e lineares representaram bem os dados experimentais, com altos coeficientes de determinação e baixas raízes de erro quadrático médio. Por meio dos modelos sigmóides foi possível a identificação dos teores máximos de perdas (a ou A_2), a taxa relativa máxima (k) e ponto de inflexão (T_c) para cada uma das curvas ajustadas. Os pontos de inflexão obtidos pelos modelos correspondentes apontam o intervalo de temperatura de 64 a 94 °C como período de maiores mudanças estruturais da carne durante o assamento. De

acordo com o DSC de lombo suíno (Figura 27), no intervalo de temperatura encontrado, ocorrem as principais transições endotérmicas correspondentes à desnaturação de proteínas (56,03 a 86,23 °C) e relacionadas com as mudanças nas propriedades físicas aqui estudadas.

Tabela 4 - Parâmetros dos modelos ajustados aos dados relacionados na Figura 36 e 37 e seus coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Constantes do modelo sigmoide: $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{T}{T_c}\right)^k}$						
	A_1	A_2	T_c	k	R^2	$RMSE$
PC (%) $x T_{centro}$ (°C)	2,64	52,71	81,18	8,94	0,98	1,27
SSP (%) $x T_{centro}$ (°C)	0,11	6,13	63,91	6,30	0,99	1,04
Suculência (%) $x T_{centro}$ (°C)	8,85	0,27	76,68	13,78	0,99	1,17
Encolhimento (%) $x T_{centro}$ (°C)	0,43	99,51	93,56	3,78	0,99	1,62
FCis (N) $x T_{centro}$ (°C)	86,82	197,89	84,55	9,12	0,93	0,61
VE (kcal·100 g ⁻¹) $x T_{centro}$ (°C)	117,28	247,40	83,28	6,27	0,97	2,46
Constantes do modelo sigmoide: $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{T}{U_c}\right)^k}$						
	A_1	A_2	U_c	k	R^2	$RMSE$
SSP (%) $x U_{global}$ (b. s)	5,54	-8,25	2,37	7,62	0,99	0,84
Constantes do modelo linear: $y = b + cU$						
	b	c	R^2	$RMSE$		
PC (%) $x U_{global}$ (b. s)	73,24	-26,41	0,99	0,50		
Suculência (%) $x U_{global}$ (b. s)	-6,28	5,65	0,98	1,37		
Encolhimento (%) $x U_{global}$ (b. s)	94,04	-34,29	0,97	3,15		
FCis (N) $x U_{global}$ (b. s)	219,67	-49,88	0,94	0,54		
VE (kcal·100 g ⁻¹) $x U_{global}$ (b. s)	272,09	-53,76	0,94	3,56		

PC (Perdas de cozimento); SSP (Sólidos Solúveis Perdidos); Encolhimento (Encolhimento de volume); FCis (Força de Cisalhamento); VE (Valor energético); T_{centro} (°C); (Temperatura do centro) e U_{Global} (b.s) (Umidade global)

4.3.9 Análise de correlação em propriedades físicas de lombo suíno assado

As correlações entre as propriedades físicas e temperatura central de lombo suíno assado são apresentadas na Figura 39. Os resultados mostraram que a temperatura do centro teve correlações positivas com as perdas por cozimento ($r = 0,94$) ($p < 0,001$), as perdas de sólidos solúveis ($r = 0,97$), a força de cisalhamento ($r = 0,90$) e o encolhimento de volume ($r = 0,96$), mas correlacionou-se negativamente com a umidade global ($r = -0,93$) e assim com a suculência ($r = -0,93$) de lombo suíno assado. Isso se justifica, pois a umidade global tem correlação positiva com a suculência ($r = 0,99$) ($p < 0,001$), como esperado. Por outro lado, a perda de

umidade está correlacionada positivamente com a perdas de sólidos solúveis ($r = -0,960$), com força de cisalhamento ($r = -0,98$) e com o encolhimento de volume ($r = -0,99$).

As perdas por cozimento também foram correlacionadas negativamente com a suculência ($r = -0,99$) ($p < 0,001$) e positivamente com perdas de sólidos solúveis ($r = 0,96$), força de cisalhamento ($r = 0,99$) e encolhimento de volume ($r = 0,99$). A suculência foi correlacionada negativamente com a força de cisalhamento ($r = -0,98$) ($p < 0,001$) e encolhimento de volume ($r = -0,99$), o que se explica pela correção negativa da suculência com a perda de água. A força de cisalhamento apresentou correlações positivas com o encolhimento de volume ($r = 0,98$) ($p < 0,001$), o que se explica fisicamente pela perda de água associada e pelo adensamento da estrutura do lombo suíno.

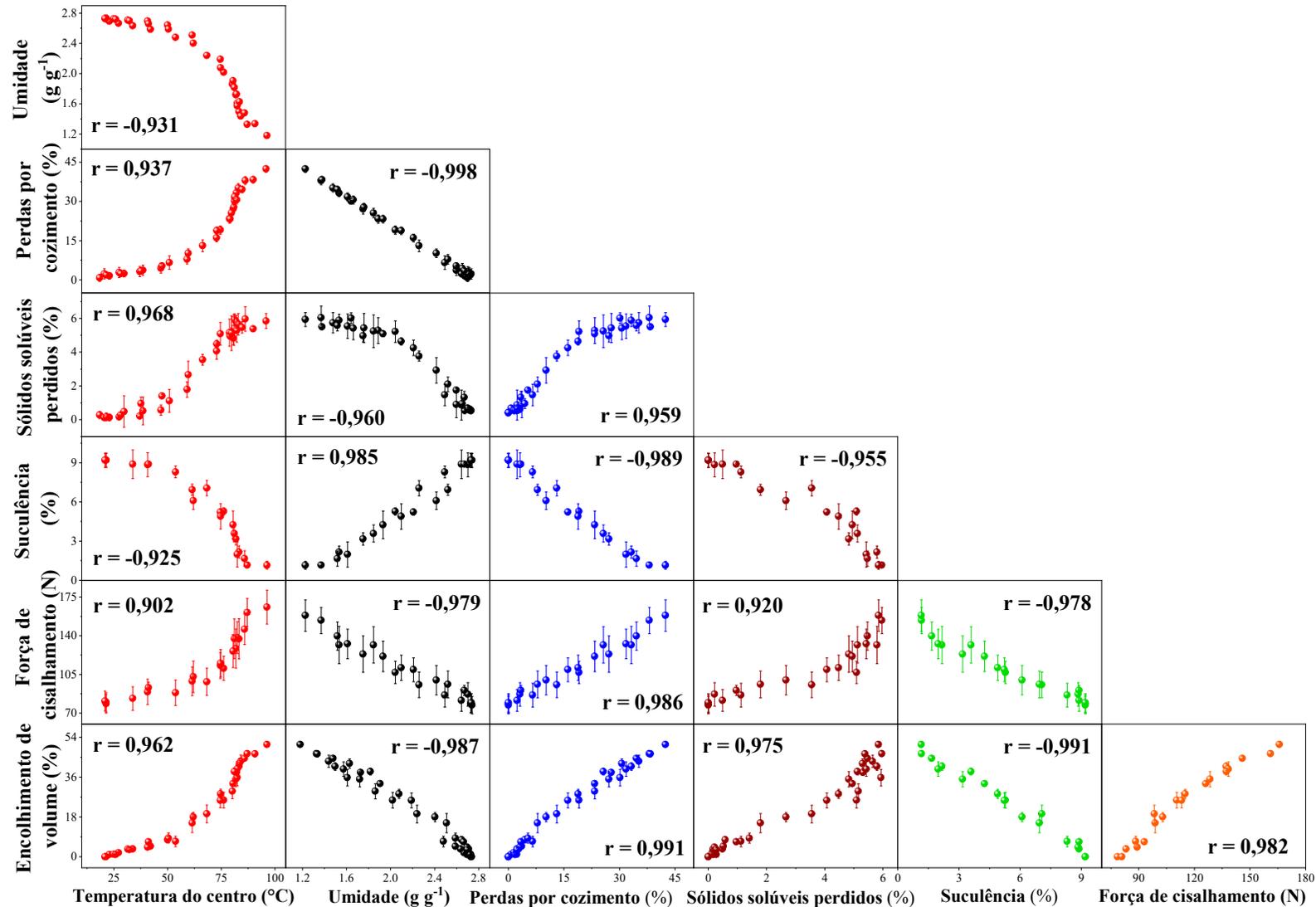
As correlações encontradas são importantes para compreender os fenômenos físicos simultâneos que ocorrem durante o processo de assamento. Estes resultados indicam que durante o assamento as perdas de água carregam sólidos solúveis, diminuindo a suculência. Paralelamente, há um aumento das concentrações dos componentes da carne que também causa um adensamento das fibras (encolhimento) do tecido muscular, favorecendo o aumento nos valores de força de cisalhamento da carne assada (TORBERG, 2005; ZHENG; SUN; ZHENG, 2007; DU; IQBAL; SUN, 2016). O encolhimento pode ocasionar alterações substanciais na carne durante o assamento, afetando diretamente a textura e a perda de umidade, reduzindo a suculência e aumentando a resistência ao corte da carne (PURSLOW et al., 2016). Durante o processamento térmico, o diâmetro das fibras musculares e o comprimento do sarcômero diminuem pela desnaturação de proteínas, favorecendo a liberação de água, proteínas solúveis e gorduras (PALKA; DAUN, 1999).

Maiores perdas no cozimento, que resultam em menor suculência, foram observadas para maiores temperaturas de assamento (AASLYNG et al., 2003). Morfologicamente, a área de seção transversal às miofibrilas diminui ao longo do cozimento, dependendo fortemente das condições de processo. Quanto maiores as perdas por cozimento, menor é a área da seção transversal às miofibrilas (ASTRUC et al., 2010).

Algumas das correlações registradas em literatura são: comprimento do sarcômero e perdas de cozimento em carne bovina cozida ($r = -0,968$) (PALKA; DAUN, 1999), perdas de cozimento e área de retração em pasteurização de salmão ($< 80\%$) (OVISSIPOUR et al., 2017), perda de cozimento e encolhimento de área ($< 0,74$), perdas de cozimento e força de compressão ($< 0,87$) e encolhimento de área e força de compressão para mexilhão azul inteiro pasteurizado em diferentes temperaturas ($< 0,91$) (OVISSIPOUR et al., 2013), umidade e com maciez ($r = -0,58$), teor de gordura e suculência ($r = -0,87$), umidade e suculência ($r = 0,97$), umidade e perda

de cozimento ($r = -0,98$), força de cisalhamento e perda de cozimento ($r = 0,84$) em músculos bovinos assados (MODZELEWSKA-KAPITUŁA et al., 2012).

Figura 39 - Diagramas de dispersão do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre as propriedades físicas de lombo suíno assado.



Todas as correlações foram significativas ($p < 0,001$) a um nível de significância de 5%. Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.4 CONCLUSÃO

A caracterização térmica de lombo suíno mostrou que a desnaturação das proteínas ocorre de maneira gradual em diferentes temperaturas, reduzindo a CRA e aumentando G' . Por meio da calorimetria de varredura diferencial é possível identificar a desnaturação de proteínas individuais, ajudando a discussão da evolução das propriedades físicas de lombo suíno durante o assamento. A evolução das perdas no cozimento, incluindo dos sólidos solúveis, a força de cisalhamento, a suculência, o encolhimento direcional e de volume, a composição centesimal e o valor energético ocorrem de maneira simultânea e são altamente dependentes das condições de assamento. Tais propriedades e variáveis foram devidamente determinadas, modeladas e correlacionadas entre si. Durante o assamento do lombo suíno ocorre perda de massa, principalmente de água, que diminuiu a suculência, concentra os componentes e assim aumenta o valor energético da carne assada. Além disso, a saída de água da estrutura causa encolhimento multidimensional do tecido muscular, aumentando a força de cisalhamento observada no corte da carne assada. As propriedades físicas estudadas são correlacionadas, com altos coeficientes de Pearson. Os modelos ajustados com a temperatura central final e com a umidade global fornecem uma visão global da evolução das propriedades físicas de lombo suíno no assamento. Estes modelos podem ser aplicados para prever o desenvolvimento das propriedades físicas durante o assamento, com possibilidades de aplicação na otimização de fornos e condições de processo.

5 PERSPECTIVAS E DESAFIOS SOBRE ASSAMENTO DE LOMBO SUÍNO

O assamento da carne é processo complexo que envolve as transferências de calor e massa. Dessa forma, controlar e otimizar a assamento para cortes específicos, considerando a qualidade da carne assada ainda é uma tarefa complicada. A expansão de pequenas amostras para pedaços inteiros de lombo de suíno é necessária para caracterizar os fenômenos que acontecem durante o assamento no dia a dia. Essa ideologia vale para trabalhos experimentais e trabalhos focados em simular o processo de assamento por meio de modelagem matemática. O desafio do controle automático das alterações da carne durante a cozimento permitiria atingir o ponto de cozimento desejado sem o critério subjetivo do operador, promovendo melhorias a nível doméstico e industrial. Além disso, a consideração da camada de gordura que envolve a superfície do lombo suíno precisa participar do processo de assamento experimental, pois tem um papel desconhecido e essencial sob os parâmetros de qualidade do lombo assado em nosso cotidiano.

O efeito da umidade relativa durante o assamento de carne é encontrado em poucos estudos, onde dados higrométricos e avaliação sistemática de alterações na qualidade do lombo suíno assado geralmente não são relatados. Além disso, o assamento com injeção de vapor torna a transferência de calor e massa ainda mais complexa, podendo levar a resultados imprevisíveis devido aos efeitos pouco conhecidos na carne. O assamento em forno com injeção de vapor é um método alternativo ao assamento convencional com grande potencial para a carne suína assada. A assamento da carne em presença de vapor sugere a qualidade superior ao produto assado quando comparado ao assamento em forno convencional. No entanto, mais estudos relacionados às mudanças nos parâmetros de qualidade da carne são necessários para melhor aplicar essa alternativa.

O encolhimento da carne assada é uma propriedade física pouco explorada na análise de qualidade de carne assada. Um estudo detalhado do encolhimento de carnes cozidas, especialmente carnes assadas, é necessário devido à complexidade do encolhimento anisotrópico. Este parâmetro de qualidade da carne é de grande importância durante o assamento e precisa ser considerado com grande sensibilidade em estudos. A falta de estudos sobre retração em carnes assadas não favorece modelos de transferência de calor e massa para previsão de parâmetros de qualidade. Ainda, a caracterização dos poros da crosta e do interior da carne assada pode fornecer informações valiosas relacionadas ao entendimento da transferência de calor e massa no domínio estrutural da carne, além das alterações físicas que ocorrem durante a assamento sob diferentes condições de assamento.

Na prática, a crosta é caracterizada apenas como uma área fina próxima à superfície da carne, que aumenta a espessura durante o assamento. No entanto, os fenômenos e reações na superfície da carne ainda são um desafio para pesquisas futuras. Assim, são necessários estudos para caracterizar e modelar com precisão a formação da crosta e os gradientes térmicos na superfície. Além disso, a reação de Maillard na superfície de carnes assadas, principalmente o lombo de suíno assado, é pouco relatada na literatura. Os precursores dos diferentes compostos formados pelas reações de Maillard são pouco explorados na carne. Uma ideia proposta seria examinar a modelagem da migração dos precursores reativos com suco do centro da carne em direção à superfície para formar compostos tóxicos. Além disso, estudos envolvendo correlações entre a formação de compostos tóxicos e o desenvolvimento da cor da superfície são escassos. Uma compreensão completa dessas reações na carne é necessária para descobrir como promover a aceitação e a segurança alimentar e mitigar a formação de toxinas alimentares induzidas pelos parâmetros do processo de torrefação.

Os estudos deste trabalho foram conduzidos sem o uso de sal e condimentos na matéria-prima. O sal e os condimentos podem alterar significativamente as propriedades da carne assada. Dessa forma, se torna interessante a investigação do efeito do sal em tais propriedades físico-químicas de lombo suíno assado em cavidade com temperatura controlada.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO FINAL

As condições de cocção em forno afetam diretamente a qualidade do lombo suíno assado. O processo de assamento é complexo, envolvendo transferências simultâneas de calor e massa, com a presença de encolhimento, que por sua vez resulta mudanças das propriedades de transporte da carne e em mecanismos de transferência de líquido. Assim, as cinéticas de transferência de calor e matéria na superfície e no interior da carne durante o assamento determinam sua qualidade final. Essas cinéticas ocorrem de acordo com as variáveis de processo escolhidas, sendo o tempo e a temperatura de assamento as principais variáveis que afetam o assamento e as características do produto assado. O estudo da desnaturação das proteínas de lombo suíno possibilitou compreender as gradativas transformações físicas do lombo suíno durante o assamento. Também se pôde modelar matematicamente a evolução das propriedades das amostras durante o assamento em função das variáveis de processo, através de ajuste de modelos empíricos. Esses modelos podem ser acoplados a simulações dos processos de transferência de calor e massa do processo de assamento, para a predição da variação de atributos de qualidade com a temperatura. Se os atributos ótimos forem definidos, é possível otimizar as condições do processo de assamento de lombo suíno que resultem no produto assado desejado. Tais ações seriam originais e inovadoras, valorizando a engenharia de processos de assamento, e a matéria-prima.

O minucioso trabalho experimental determinou a evolução simultânea de propriedades físicas (tecnológicas) importantes do lombo suíno durante o processo de assamento. A adaptação da cavidade com o controle de temperatura mostrou-se fundamental para determinação das evoluções das propriedades físico-químicas do lombo suíno durante o assamento. A homogeneidade de temperatura de assamento garantiu a realização de experimentos reproduzíveis, com monitoramento preciso da evolução das propriedades físico-químicas do lombo suíno durante o assamento. A modelagem matemática das perdas de água e de sólidos solúveis, a força de cisalhamento desenvolvida durante o corte, a suculência, o encolhimento de volume, o valor energético e a mudança de cor no assamento de lombo suíno em função da temperatura e umidade representaram as evoluções das respostas físicas e fenomenológicas (propriedades e variáveis dependentes) durante o assamento do lombo suíno.

As evoluções da cor e da crosta do lombo suíno assado em função da temperatura e umidade da crosta representaram as transferências de calor e massa, respectivamente. As

reações de escurecimento não enzimático envolvendo oxidação lipídica e reação de Maillard foram comprovadas através de análises espectrais. Contudo, a formação e identificação de compostos de escurecimento durante o assamento de lombo suíno ainda não foi explorada e merece ser investigada no futuro com ênfase no efeito das condições de assamento.

Assim, o presente trabalho traz novidades com relação à ciência e tecnologia do assamento de carnes, com possibilidades de impactar o desenvolvimento tecnológico de fornos e escolha das condições de assamento que otimizem a função qualidade, definidas com foco no consumidor.

7 REFERÊNCIAS

AASLYNG, M. D. et al. Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure. **Food Quality and Preference**, v. 14, n. 4, p. 277–288, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(02)00086-1)>.

AASLYNG, M.; STØIER, S. The effect of intramuscular fat on eating quality of pork depending on end point temperature. In: **50th International Congress of Meat Science and Technology**. [s.l: s.n.]p. 550, 2004.

ABCS, A. B. dos C. de S. **Manual Brasileiro de Cortes Suínos** Brasília CDU 636.4, , 2010. . Disponível em: <<http://www.sossuinos.com.br/manualbrasileirocortes.pdf>>.

ABPA, A. B. de P. A. **Relatório Anual 2020**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://abpa-br.org/mercados/>>.

ABPA, A. B. de P. A. **Relatório Anual 2021**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://abpa-br.org/mercados/>>.

AGAFONKINA, I. V.; KOROLEV, I. A.; SARANTSEV, T. A. the Study of Thermal Denaturation of Beef, Pork, Chicken and Turkey Muscle Proteins Using Differential Scanning Calorimetry. **Theory and practice of meat processing**, v. 4, n. 3, p. 19–23, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.21323/2414-438X-2019-4-3-19-23>>.

AGHAJANYAN, A. E. et al. Isolation, purification and physicochemical characterization of water-soluble *Bacillus thuringiensis* melanin. **Pigment Cell Research**, v. 18, n. 2, p. 130–135, 1 abr. 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0749.2005.00211.x>>.

AKYUZ, S. et al. Pigment analyses of a portrait and paint box of Turkish artist Feyhaman Duran (1886–1970): The EDXRF, FT-IR and micro Raman spectroscopic studies. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 89, p. 74–81, 1 abr. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.12.046>>.

AMES, J. M. The Maillard Reaction. In: **Biochemistry of Food Proteins**. Boston, MA: Springer, 1992. p. 99–153.

AMSA, A. M. S. A. **Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of meat**. 2. ed. Champaign: American Meat Science Association Educational Foundation, 2015.

AOAC. **Official Methods of analysis**. 16. ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists, 1997.

ARAUJO, M. et al. Marine sponge melanin: A new source of an old biopolymer. **Structural Chemistry**, v. 23, n. 1, p. 115–122, 7 fev. 2012. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11224-011-9843-7>>.

ASTRUC, T. et al. Microstructural changes in m. rectus abdominis bovine muscle after heating. **Meat Science**, v. 85, n. 4, p. 743–751, 1 ago. 2010. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.03.035>>.

BALTES, W. Chemical changes in food by the maillard reaction. **Food Chemistry**, v. 9, n. 1–2, p. 59–73, 1 jul. 1982. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0308-8146\(82\)90069-3](https://doi.org/10.1016/0308-8146(82)90069-3)>.

BARBERA, S.; TASSONE, S. Meat cooking shrinkage: Measurement of a new meat quality parameter. **Meat Science**, v. 73, n. 3, p. 467–474, 1 jul. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.01.011>>.

BECKER, A. et al. Low temperature cooking of pork meat - Physicochemical and sensory aspects. **Meat Science**, v. 118, p. 82–88, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.026>>.

BEJERHOLM, C.; AASLYNG, M. D. The influence of cooking technique and core temperature on results of a sensory analysis of pork - Depending on the raw meat quality. **Food Quality and Preference**, v. 15, n. 1, p. 19–30, 1 jan. 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(03\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(03)00018-1)>.

BEJERHOLM, C.; TØRNGREN, M. A.; AASLYNG, M. D. Cooking of Meat. In: DIKEMAN, M.; DEVINE, C. (Ed.). **Encyclopedia of Meat Sciences**. Oxford: Academic Press, 2014. 1p. 370–376.

BENGTSSON, N. E.; JAKOBSSON, B.; SIK, M. D. Cooking of beef by oven roasting: a study of heat and mass transfer. **Journal of Food Science**, v. 41, n. 5, p. 1047–1053, 1 set. 1976. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.1976.tb14386.x>>.

BERHE, D. T. et al. Raman spectroscopic study of effect of the cooking temperature and time on meat proteins. **Food Research International**, v. 66, p. 123–131, 1 dez. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.09.010>>.

BERTOL, T. M. **Estratégias Nutricionais para melhoria da qualidade da carne suína**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2019.

BERTRAM, H. C. et al. NMR relaxometry and differential scanning calorimetry during meat cooking. **Meat Science**, v. 74, n. 4, p. 684–689, 2006. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(02)00086-1)>.

BLIKRA, M. J. et al. Dimensional change and cook loss during heating of fish: Problem formulation and semi-empirical modeling approach. **Journal of Food Engineering**, v. 281, p. 110004, 1 set. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.001>>.

BLIKRA, M. J.; SKIPNES, D.; FEYISSA, A. H. Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven. **Food Control**, v. 102, p. 29–37, 1 ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.001>>.

BOGNÁR, A. Comparative study of frying to other cooking techniques influence on the nutritive value. **Grasas y Aceites**, v. 49, n. 4–5, p. 250–260, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.3989/gya.1998.v49.i3-4.746>>.

BOTTANI, E.; VOLPI, A. An analytical model for cooking automation in industrial steam

ovens. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 2, p. 153–160, 1 jan. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.031>>.

BOUTON, P. E.; HARRIS, P. V.; SHORTHOSE, W. R. Changes in shear parameters of meat associated with structural changes produced by aging, cooking and myofibrillar contraction. **Journal of Food Science**, v. 40, n. 6, p. 1122–1126, 1 nov. 1975. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.1975.tb01032.x>>.

BOUTON, P. E.; HARRIS, P. V.; SHORTHOSE, W. R. Dimensional changes in meat during cooking. **Journal of Texture Studies**, v. 7, n. 2, p. 179–192, 1 set. 1976. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1745-4603.1976.tb01260.x>>.

BOWERS, L. J. et al. Cooked yields, color, tenderness, and sensory traits of beef roasts cooked in an oven with steam generation versus a commercial convection oven to different endpoint temperatures. **Meat Science**, v. 92, n. 2, p. 97–106, 1 out. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.019>>.

CALABRÒ, E.; MAGAZÙ, S. Non-thermal effects of microwave oven heating on ground beef meat studied in the mid-infrared region by fourier transform infrared spectroscopy. **Spectroscopy Letters**, v. 47, n. 8, p. 649–656, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00387010.2013.828313>>.

CALABRÒ, E.; MAGAZÙ, S. Modulation of Maillard reaction and protein aggregation in bovine meat following exposure to microwave heating and possible impact on digestive processes: An FTIR spectroscopy study. **Electromagnetic Biology and Medicine**, v. 39, n. 2, p. 129–138, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1737805>>.

CÁRDENAS-PÉREZ, S. et al. Evaluation of the ripening stages of apple (Golden Delicious) by means of computer vision system. **Biosystems Engineering**, v. 159, p. 46–58, 1 jul. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.009>>.

CARTON, I. et al. Monitoring Secondary Structural Changes in Salted and Smoked Salmon Muscle Myofiber Proteins by FT-IR Microspectroscopy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 9, p. 3563–3570, 13 maio 2009. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jf803668e>>.

CEPEDA, J. F. et al. Heat and Mass Transfer Modeling for Microbial Food Safety Applications in the Meat Industry: A Review. **Food Engineering Reviews**, v. 5, n. 2, p. 57–76, 26 jun. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12393-013-9063-6>>.

CHANG, H. et al. Identifying and characterizing the components related to the brown color of Chinese sugar-smoked chicken during processing. **Poultry Science**, v. 100, n. 3, p. 100937, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.12.034>>.

CHANNON, H. A.; D'SOUZA, D. N.; DUNSHEA, F. R. Developing a cuts-based system to improve consumer acceptability of pork: Impact of gender, ageing period, endpoint temperature and cooking method. **Meat Science**, v. 121, p. 216–227, 1 nov. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.011>>.

CHANNON, H. A.; PAYNE, A. M.; WARNER, R. D. Halothane genotype, pre-slaughter

handling and stunning method all influence pork quality. **Meat Science**, v. 56, n. 3, p. 291–299, 1 nov. 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00056-5)>.

CHEN, G.; SCOTT, S. J. Determination of advanced glycation endproducts in cooked meat products. **Food Chemistry**, v. 168, p. 190–195, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.081>>.

CHENG, Q.; SUN, D.-W. Factors Affecting the Water Holding Capacity of Red Meat Products: A Review of Recent Research Advances. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 48, n. 2, p. 137–159, 31 jan. 2008. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408390601177647>>.

CHIAVARO, E. et al. Cooking of pork Longissimus dorsi at different temperature and relative humidity values: Effects on selected physico-chemical properties. **Journal of Food Engineering**, v. 93, n. 2, p. 158–165, 1 jul. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.010>>.

CHOI, E. J. et al. Effect of tempering methods on quality changes of pork loin frozen by cryogenic immersion. **Meat Science**, v. 124, p. 69–76, 1 fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.003>>.

CHOUDHARY, A. et al. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) formation, occurrence and potential health concerns: recent developments. **Toxin Reviews**, v. 40, n. 4, p. 545–561, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15569543.2020.1756857>>.

CHRISTENSEN, M. et al. Relationship between collagen characteristics, lipid content and raw and cooked texture of meat from young bulls of fifteen European breeds. **Meat Science**, v. 87, n. 1, p. 61–65, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.09.003>>.

CHRISTENSEN, M.; PURSLOW, P. P.; LARSEN, L. M. The effect of cooking temperature on mechanical properties of whole meat, single muscle fibres and perimysial connective tissue. **Meat Science**, v. 55, n. 3, p. 301–307, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00157-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00157-6)>.

CRAWFORD, S. M. et al. Effects of cooked temperature on pork tenderness and relationships among muscle physiology and pork quality traits in loins from Landrace and Berkshire swine. **Meat Science**, v. 84, n. 4, p. 607–612, 1 abr. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.10.019>>.

DANOWSKA-OZIEWICZ, M.; KARPIŃSKA-TYMOSZCZYK, M.; BOROWSKI, J. The effect of cooking in a steam-convection oven on the quality of selected dishes. **Journal of Foodservice**, v. 18, n. 5, p. 187–197, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-4506.2007.00065.x>>.

DELGADO-ANDRADE, C. et al. Maillard reaction indicators in diets usually consumed by adolescent population. **Molecular Nutrition and Food Research**, v. 51, n. 3, p. 341–351, mar. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/mnfr.200600070>>.

DELGADO-ANDRADE, C. et al. Development of the Maillard reaction in foods cooked by different techniques. Intake of Maillard-derived compounds. **Food Chemistry**, v. 122, n. 1, p.

145–153, 1 set. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.031>>.

DENIZ, E. et al. Differentiation of beef mixtures adulterated with chicken or turkey meat using FTIR spectroscopy. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 10, p. e13767, 1 out. 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfpp.13767>>.

DIAMANT, R.; WATTS, B. .; CLIPLEF, R. . Consumer Criteria for Pork Related to Sensory, Physical and Descriptive Attributes. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v. 9, n. 3, p. 151–154, 1 jul. 1976. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0315-5463\(76\)73650-2](https://doi.org/10.1016/s0315-5463(76)73650-2)>.

DINH, T. T. N.; TO, K. V.; SCHILLING, M. W. Fatty Acid Composition of Meat Animals as Flavor Precursors. **Meat and Muscle Biology**, v. 5, n. 1, p. 1–16, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.22175/mmb.12251>>.

DREWNOWSKA, J. M. et al. Melanin-Like Pigment Synthesis by Soil *Bacillus weihenstephanensis* Isolates from Northeastern Poland. **PLoS ONE**, v. 10, n. 4, 24 abr. 2015. Disponível em: <[/pmc/articles/PMC4409349/](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124493)>.

DU, C. J.; IQBAL, A.; SUN, D. W. Quality Measurement of Cooked Meats. In: **Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation**. 2. ed. [s.l.] Academic Press, 2016. p. 195–212.

DU, C. J.; SUN, D. W. Automatic measurement of pores and porosity in pork ham and their correlations with processing time, water content and texture. **Meat Science**, v. 72, n. 2, p. 294–302, fev. 2006. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22061557/>>.

DU, C.; SUN, D. Correlating shrinkage with yield, water content and texture of pork ham by computer vision. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 3, p. 219–232, 1 jun. 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1745-4530.2005.00408.x>>.

DUMA-KOCAN, P. et al. The effect of selected methods of heat treatment on the chemical composition, colour and texture parameters of longissimus dorsi muscle of wild boars. **CYTA - Journal of Food**, v. 17, n. 1, p. 472–478, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1603172>>.

DUMAS, P.; MILLER, L. The use of synchrotron infrared microspectroscopy in biological and biomedical investigations. **Vibrational Spectroscopy**, v. 32, n. 1 SPEC., p. 3–21, 5 ago. 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(03\)00043-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(03)00043-2)>.

FAO, O. de las N. U. para la A. y la A.; OCDE, O. para la C. y el D. E. OCDE/FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028 - Enfoque Especial: América Latina. **París/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)**, p. 348, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/7b2e8ba3-es>>.

FELLOWS, P. J. **Food processing technology: principles and practice**. 4. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.

FEYISSA, A. H. **Robust Modelling of Heat and Mass Transfer in Processing of Solid Foods**. 2011. Tese de Doutorado em National Food Institute, Food Production Engineering,

Universidad Técnica de Dinamarca, Lyngby, Denmark, 2011.

FEYISSA, A. H. et al. Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. **Journal of Food Engineering**, v. 106, n. 3, p. 228–235, 1 out. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.014>>.

FEYISSA, A. H.; ADLER-NISSEN, J.; GERNAEY, K. Mechanism of water transport in meat during the roasting process. **Process technology**, v. 2018, n. January, 2009. Disponível em: <<https://orbit.dtu.dk/en/publications/344fc4a2-79ed-4f2b-8b7b-87f852c38cc0>>.

FEYISSA, A. H.; GERNAEY, K. V.; ADLER-NISSEN, J. 3D modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. **Meat Science**, v. 93, n. 4, p. 810–820, 1 abr. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.12.003>>.

FRANCI, O. et al. Performance of Cinta Senese pigs and their crosses with Large White. 1 Muscle and subcutaneous fat characteristics. **Meat Science**, v. 69, n. 3, p. 545–550, 1 mar. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.10.005>>.

GAFFIELD, K. N. et al. Evaluation of the changes in composition of pork chops during cooking. **Translational Animal Science**, v. 4, n. 3, p. 1–6, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/tas/txaa154>>.

GIBIS, M. Heterocyclic Aromatic Amines in Cooked Meat Products: Causes, Formation, Occurrence, and Risk Assessment. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 2, p. 269–302, 1 mar. 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1541-4337.12186>>.

GOMIDE, A. M.; RAMOS, E. M.; FONTES, P. R. **Ciência e qualidade da carne: Fundamentos**. Viçosa: Editora UFV, 2013.

GOÑI, S. M.; SALVADORI, V. O. Prediction of cooking times and weight losses during meat roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 1, p. 1–11, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.016>>.

GORAN, G. V. et al. Comparative study of mineral composition of beef steak and pork chops depending on the thermal preparation method. **Meat Science**, v. 118, p. 117–121, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.031>>.

HEYMANN, H. et al. Sensory and Chemical Characteristics of Fresh Pork Roasts Cooked to Different Endpoint Temperatures. **Journal of Food Science**, v. 55, n. 3, p. 613–617, 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb05189.x>>.

HIDALGO, F. J.; ZAMORA, R. Modification of bovine serum albumin structure following reaction with 4,5(e)-epoxy-2(E)-heptenal. **Chemical Research in Toxicology**, v. 13, n. 6, p. 501–508, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/tx990205p>>.

HODGE, J. E. Chemistry of Browning Reactions in Model Systems. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 1, p. 928–943, 1953.

HONIKEL, K. O. How to measure the water-holding capacity of meat? Recommendation of

standardized methods. **Evaluation and Control of Meat Quality in Pigs**, v. 28, n. 44, p. 129–142, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3301-9_11>.

HUGHES, J. M. et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. **Meat Science**, v. 98, n. 3, p. 520–532, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.022>>.

HUMAID, S. et al. Physicochemical Properties and Consumer Acceptance of High-Pressure Processed, Sous Vide-Cooked Lobster Tails. **Journal of Food Science**, v. 84, n. 12, p. 3454–3462, 1 dez. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1750-3841.14954>>.

IOANNOU, A.; VAROTSIS, C. Open Access Real Time Monitoring the Maillard Reaction Intermediates by HPLC-FTIR. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4172/2161-0398.1000210>>.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 1443**: Meat and meat products -- Determination of total fat content. Geneve: ISO, 1973.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 1442**: Meat and meat products -- Determination of moisture content (Reference method). Geneve: ISO, 1997.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 936**: Meat and meat products -- Determination of total ash. Geneve: ISO, 1998.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 1871**: Food and feed products - General guidelines for the determination of nitrogen by the Kjeldahl method. Geneve: ISO, 2009.

JAMOVI. **The jamovi project (Computer Software)** Computer Software, , 2021. . Disponível em: <<https://www.jamovi.org>>.

KERTH, C. R. **The Science of Meat Quality**. 1. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.

KIMURA, T. et al. Characterization of water-soluble dark-brown pigment from Antarctic bacterium, *Lysobacter oligotrophicus*. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 120, n. 1, p. 58–61, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.11.020>>.

KONDJOYAN, A. et al. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. **Meat Science**, v. 95, n. 2, p. 336–344, 1 out. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.061>>.

KONDJOYAN, A. et al. Towards models for the prediction of beef meat quality during cooking. **Meat Science**, v. 97, n. 3, p. 323–331, 1 jul. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.07.032>>.

KONDJOYAN, A. et al. Relation between crust development and heterocyclic aromatic amine formation when air-roasting a meat cylinder. **Food Chemistry**, v. 213, p. 641–646, 15 dez. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.118>>.

KONG, J.; YU, S. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. **Acta Biochimica et Biophysica Sinica**, v. 39, n. 8, p. 549–559, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>>.

KRISTENSEN, L. et al. Dietary-induced changes of muscle growth rate in pigs: Effects on in vivo and postmortem muscle proteolysis and meat quality1. **Journal of Animal Science**, v. 80, n. 11, p. 2862–2871, 1 nov. 2002. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jas/article/80/11/2862/4789316>>.

LAWRIE, R. A.; LEDWARD, D. **Lawrie's Meat Science**. 7. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.

LIMA, D. . et al. **Tabela Brasileira de composição de Alimentos**. 4. ed. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2011.

LIN, X. et al. Effect of electron irradiation and heat on the structure of hairtail surimi. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 114, p. 50–54, 1 set. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.05.028>>.

LIU, Y. et al. Chemical properties of vacuum-fried *Pleurotus eryngii* during storage and characterization of brown pigment. **International Journal of Food Properties**, v. 20, n. 3, p. S2349–S2358, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1369993>>.

LLAVE, Y. et al. Analysis of the color developed during carbonization of grilled fish by kinetics and computer imaging. **Food Science and Technology Research**, v. 20, n. 5, p. 1051–1061, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3136/fstr.20.1051>>.

LOCKER, R. H.; DAINES, G. J. Effect of mode of cutting on cooking loss in beef. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 25, n. 8, p. 939–946, 1 ago. 1974. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jsfa.2740250809>>.

LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Total Porosity and Open-Pore Porosity in the Drying of Fruits. **Journal of Food Science**, v. 45, n. 5, p. 1403–1407, 1980. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb06564.x>>.

LUCHERK, L. W. et al. Assessment of objective measures of beef steak juiciness and their relationships to sensory panel juiciness ratings. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 6, p. 2421–2437, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.2527/jas2016.0930>>.

MACHARÁČKOVÁ, B. et al. Changes in the concentrations of selected mineral elements in pork meat after sous-vide cooking. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 96, p. 103752 Contents, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103752>>.

MACLEOD, G.; SEYYEDAIN-ARDEBILI, M. Natural and simulated meat flavors (with particular reference to beef). **C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 14, n. 4, p. 309–437, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10408398109527309>>.

MAGANHINI, M. B. et al. Carnes PSE (Pale, Soft, Exudative) e DFD (Dark, Firm, Dry) em lombo suíno numa linha de abate industrial. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, v. 27, p. 69–72, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000500012>>.

MARTENS, H.; STABURSVIK, E.; MARTENS, M. Texture and colour changes in meat during cooking related to thermal denaturation of muscle proteins. **Journal of Texture Studies**, v. 13, n. 3, p. 291–309, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1982.tb00885.x>>.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373–386, 1 fev. 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)>.

MCDONALD, K.; SUN, D. W. Formation of pores and their effects in a cooked beef product on the efficiency of vacuum cooling. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 3, p. 175–183, 1 fev. 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00111-4)>.

MCKILLIP, K. V. et al. Sensory Evaluation of Enhanced Beef Strip Loin Steaks Cooked to 3 Degrees of Doneness. **Meat and Muscle Biology**, v. 1, n. 1, p. 227–241, 2017a. Disponível em: <<https://doi.org/10.22175/mmb2017.06.0033>>.

MCKILLIP, K. V. et al. Repeatability and Accuracy of the Pressed Juice Percentage Method at Sorting Steaks into Juiciness Categories. **Meat and Muscle Biology**, v. 1, p. 242–252, 2017b. Disponível em: <<https://doi.org/10.22175/mmb2017.07.0034>>.

MIRCESCU, N. E. et al. FTIR, FT-Raman, SERS and DFT study on melamine. **Vibrational Spectroscopy**, v. 62, p. 165–171, 1 set. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.VIBSPEC.2012.04.008>>.

MISTRY, H. et al. Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 17–18, p. 2448–2456, 1 dez. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.007>>.

MITRA, B. et al. Advanced glycation end products, protein crosslinks and post translational modifications in pork subjected to different heat treatments. **Meat Science**, v. 145, p. 415–424, 1 nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.>>.

MODZELEWSKA-KAPITUŁA, M. et al. The effect of muscle, cooking method and final internal temperature on quality parameters of beef roast. **Meat Science**, v. 91, n. 2, p. 195–202, 1 jun. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.021>>.

MOHSIN, F. G. et al. How alanine catalyzes melanoidin formation and dehydration during synthesis from glucose. **European Food Research and Technology**, v. 1, p. 3, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00217-022-03989-x>>.

MOHSIN, G. F. et al. PCA-based identification and differentiation of FTIR data from model melanoidins with specific molecular compositions. **Food Chemistry**, v. 281, p. 106–113, 30 maio 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.054>>.

MOHSIN, G. F. et al. Melanoidin formed from fructosylalanine contains more alanine than melanoidin formed from d-glucose with L-alanine. **Food Chemistry**, v. 305, p. 125459, 1 fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125459>>.

MORA, B. et al. Effect of different air/steam convection cooking methods on turkey breast meat: Physical characterization, water status and sensory properties. **Meat Science**, v. 88, n. 3, p. 489–497, 1 jul. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.01.033>>.

MORALES, F. J.; JIMÉNEZ-PÉREZ, S. Peroxyl radical scavenging activity of melanoidins in aqueous systems. **European Food Research and Technology**, v. 218, n. 6, p. 515–520, 3 maio 2004. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00217-004-0896-3>>.

MORALES, F. J.; VAN BOEKEL, M. A. J. S. A study on advanced maillard reaction in heated casein/sugar solutions: Fluorescence accumulation. **International Dairy Journal**, v. 7, n. 11, p. 675–683, 24 out. 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(97\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(97)00071-X)>.

MORGAN, J. B.; CALKINS, C. R.; MANDIGO, R. W. Effect of Trim Level, Cooking Method, and Chop Type on Lipid Retention, Caloric Content, and Cholesterol Level in Cooked Pork. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 6, p. 1602–1604, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb07795.x>>.

MOTTRAM, D. S.; EDWARDS, R. A. The role of triglycerides and phospholipids in the aroma of cooked beef. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 34, n. 5, p. 517–522, 1983. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/jsfa.2740340513>>.

MOYA, J. et al. Color changes in beef meat during pan cooking: kinetics, modeling and application to predict turn over time. **European Food Research and Technology**, v. 247, p. 2751–2764, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00217-021-03821-y>>.

MOYA, J. et al. Development and validation of a computational model for steak double-sided pan cooking. **Journal of Food Engineering**, v. 298, p. 110498, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110498>>.

NAMIKI, M. Chemistry of maillard reactions: Recent studies on the browning reaction mechanism and the development of antioxidants and mutagens. **Advances in Food Research**, v. 32, n. C, p. 115–184, 1988. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60287-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60287-6)>.

NOLD, R. A. et al. Characterization of muscles from boars, barrows, and gilts slaughtered at 100 or 110 kilograms: differences in fat, moisture, color, water-holding capacity, and collagen. **Journal of Animal Science**, v. 77, n. 7, p. 1746, 1 jul. 1999. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jas/article/77/7/1746-1754/4625518>>.

NPPC, N. P. P. C. The Pork Quality Targets. **National Pork Board**, p. 1, 1998.

NPPC, N. P. P. C. **Pork quality standards**. Des Moines National Pork Producers Council, , 1999. .

NUNES, C.; BAPTISTA, A. Implicações da reacção de Maillard nos alimentos e nos sistemas biológicos Implications of the Maillard reaction in food and in biological systems. **New York**, v. 96, n. 538, p. 53–59, 2001.

OCDE/FAO. **OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2018**. OECD Publi ed. Roma: París/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2019.

OFFER, G. et al. The structural basis of the water-holding, appearance and toughness of meat and meat products. **Food Microstructure**, v. 8, n. 1, p. 151–170, 1989.

OFFER, G.; COUSINS, T. The mechanism of drip production: Formation of two compartments of extracellular space in muscle Post mortem. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 58, n. 1, p. 107–116, 1 jan. 1992. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.2740580118>>.

OVISSIPOUR, M. et al. Kinetics of quality changes in whole blue mussel (*Mytilus edulis*) during pasteurization. **Food Research International**, v. 53, n. 1, p. 141–148, 1 ago. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2013.04.029>>.

OVISSIPOUR, M. et al. Kinetics of Protein Degradation and Physical Changes in Thermally Processed Atlantic Salmon (*Salmo salar*). **Food Bioprocess Technol**, v. 10, n. 10, p. 1865–1882, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11947-017-1958-4>>.

PAKULA, C.; STAMMINGER, R. Measuring changes in internal meat colour, colour lightness and colour opacity as predictors of cooking time. **Meat Science**, v. 90, n. 3, p. 721–727, 1 mar. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.11.002>>.

PALKA, K.; DAUN, H. Changes in texture, cooking losses, and myofibrillar structure of bovine M. semitendinosus during heating. **Meat Science**, v. 51, n. 3, p. 237–243, 1 mar. 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(98\)00119-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)00119-3)>.

PATHARE, P. B.; ROSKILLY, A. P. Quality and Energy Evaluation in Meat Cooking. **Food Engineering Reviews**, v. 8, n. 4, p. 435–447, 1 dez. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12393-016-9143-5>>.

POKORNÝ, J. Substrate influence on the frying process. **Grasas y Aceites**, v. 49, n. 4–5, p. 265–270, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.3989/gya.1998.v49.i3-4.726>>.

POLAK, T. et al. Heterocyclic amines in aged and thermally treated pork longissimus dorsi muscle of normal and PSE quality. **LWT - Food Science and Technology**, v. 42, n. 2, p. 504–513, 1 mar. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.09.014>>.

PÖLDVERE, A. et al. Effect of heat treatment at constant 120 °C temperature on the rheological and technological properties of pork. **Agronomy Research**, v. 14, n. Special Issue 2, p. 1434–1441, 2016.

PORTANGUEN, S. et al. Mechanisms of Crust Development at the Surface of Beef Meat Subjected to Hot Air: An Experimental Study. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 11, p. 3308–3318, 5 out. 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-014-1321-y>>.

PORTO BARBOSA, J. H. et al. A determinação dos produtos avançados de glicação (AGEs) e de lipoxidação (ALEs) em alimentos e em sistemas biológicos: avanços, desafios e perspectivas. **Química Nova**, v. 39, n. 5, p. 608–620, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160048>>.

PURCHAS, R. W. Tenderness measurement. In: DIKEMAN, M.; DEVINE, C. (Ed.).

Encyclopedia of Meat Sciences. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2014. p. 452–459.

PURSLOW, P. P. New Developments on the Role of Intramuscular Connective Tissue in Meat Toughness. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 133–153, 2014a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-food-030212-182628>>.

PURSLOW, P. P. et al. The structural basis of cooking loss in beef: Variations with temperature and ageing. **Food Research International**, v. 89, p. 739–748, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.010>>.

PURSLOW, P. P. **New Aspects of Meat Quality: From Genes to Ethics**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.

RABELER, F.; FEYISSA, A. H. Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. **Journal of Food Engineering**, v. 237, p. 60–68, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.021>>.

RABELER, F.; SKYTTE, J. L.; FEYISSA, A. H. Prediction of thermal induced color changes of chicken breast meat during convective roasting: A combined mechanistic and kinetic modelling approach. **Food Control**, v. 104, p. 42–49, 1 out. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.018>>.

RAMOS, E. M.; GOMIDE, L. A. de M. Textura, suculência e maciez da carne. In: **Avaliação da Qualidade de Carnes - Fundamentos e Metodologias**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2017. p. 256–335.

RANKEN, M. D. **Handbook Of Meat Product Technology**. Oxford: Blackwell Science, 2000.

RHEE, K. S.; GRIFFITH-BRADLE, H. A.; ZIPRIN, Y. A. Nutrient composition and retention in browned ground beef, lamb, and pork. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 6, n. 3, p. 268–277, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1006/jfca.1993.1029>>.

RINALDI, M.; CHIAVARO, E.; MASSINI, R. Original article: Apparent thermal diffusivity estimation for the heat transfer modelling of pork loin under air/steam cooking treatments. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 9, p. 1909–1917, 1 set. 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.2010.02360.x>>.

RØDBOTTEN, M. et al. A sensory map of the meat universe. Sensory profile of meat from 15 species. **Meat Science**, v. 68, n. 1, p. 137–144, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.02.016>>.

ROHMAN, A. et al. Analysis of pork adulteration in beef meatball using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. **Meat Science**, v. 88, n. 1, p. 91–95, maio 2011.

ROURKE, T. J. et al. Consumption and Plate Waste of Regular and Total Trim Roasted Pork Loins. **Journal of Muscle Foods**, v. 3, n. 4, p. 341–354, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.1992.tb00486.x>>.

SA-ADCHOM, P. et al. Mathematical model of pork slice drying using superheated steam. **Journal of Food Engineering**, v. 104, n. 4, p. 499–507, 1 jun. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.025>>.

SALVADOR, P. et al. Color stabilization of porcine hemoglobin during spray-drying and powder storage by combining chelating and reducing agents. **Meat Science**, v. 83, n. 2, p. 328–333, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.001>>.

SÁNCHEZ DEL PULGAR, J.; GÁZQUEZ, A.; RUIZ-CARRASCAL, J. Physico-chemical, textural and structural characteristics of sous-vide cooked pork cheeks as affected by vacuum, cooking temperature, and cooking time. **Meat Science**, v. 90, n. 3, p. 828–835, 1 mar. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.024>>.

SAZONOVA, S. et al. FTIR spectroscopy studies of high pressure-induced changes in pork macromolecular structure. **Journal of Molecular Structure**, v. 1186, p. 377–383, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.03.038>>.

SILVA, T. H. L. **Determinação experimental das propriedades físicas e químicas de pães durante o assamento**. 2020. 0 Dissertação de mestrado. Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216622>>.

SILVA, T. H. L. et al. Kinetics of bread physical properties in baking depending on actual finely controlled temperature. **Food Control**, v. 137, p. 108898, 1 jul. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2022.108898>>. Acesso em: 4 abr. 2022.

STAROWICZ, M.; ZIELIŃSKI, H. How Maillard Reaction Influences Sensorial Properties (Color, Flavor and Texture) of Food Products? **Food Reviews International**, v. 35, n. 8, p. 707–725, 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/87559129.2019.1600538>>.

STRAADT, I. K. et al. Aging-induced changes in microstructure and water distribution in fresh and cooked pork in relation to water-holding capacity and cooking loss – A combined confocal laser scanning microscopy (CLSM) and low-field nuclear magnetic resonance relaxation study. **Meat Science**, v. 75, n. 4, p. 687–695, 1 abr. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2006.09.019>>.

STUART, B. H. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2004. v. 8

SUMAN, S. P. et al. Improving beef color stability: Practical strategies and underlying mechanisms. **Meat Science**, v. 98, n. 3, p. 490–504, 1 nov. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.032>>.

SUMAN, S. P. et al. Factors influencing internal color of cooked meats. **Meat Science**, v. 120, p. 133–144, 1 out. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.006>>.

SZMAŃKO, T. et al. Influence of cutting methods and heat treatment on selected technological properties and structure of pork longissimus thoracis et lumborum muscle. **Meat Science**, v. 171, p. 108280, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108280>>.

THERKILDSEN, M. et al. Compensatory growth response in pigs, muscle protein turn-over and meat texture: Effects of restriction/realimentation period. **Animal Science**, v. 75, n. 3, p. 367–377, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/s1357729800053145>>. Acesso em: 18 maio. 2020.

TORNBERG, E. Effects of heat on meat proteins - Implications on structure and quality of meat products. **Meat Science**, v. 70, n. 3, p. 493–508, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.021>>.

TREVISAN, A. J. B. **Formação de produtos da reação de Maillard em carne bovina (Semimembranosus) submetida a diferentes técnicas de cocção**. 2015. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Nutrição. Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/89/89131/tde-26022016-101559/en.php>>.

TREVISAN, A. J. B. et al. Influence of home cooking conditions on Maillard reaction products in beef. **Food Chemistry**, v. 196, p. 161–169, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.008>>.

TU, Y. G. et al. Physicochemical characterisation and antioxidant activity of melanin from the muscles of Taihe Black-bone silky fowl (*Gallus gallus domesticus* Brisson). **Food Chemistry**, v. 114, n. 4, p. 1345–1350, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.015>>.

VASKOSKA, R. et al. Evaluation of 3D Laser Scanning for Estimation of Heating-Induced Volume Shrinkage and Prediction of Cooking Loss of Pork Cuboids Compared to Manual Measurements. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, n. 6, p. 938–947, 1 jun. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11947-020-02421-0>>.

VITTADINI, E. et al. The effect of different convection cooking methods on the instrumental quality and yield of pork Longissimus dorsi. **Meat Science**, v. 69, n. 4, p. 749–756, 1 abr. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.005>>.

VOUTILA, L. et al. Thermal stability of connective tissue from porcine muscles. **Meat Science**, v. 76, n. 3, p. 474–480, 1 jul. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.12.012>>.

WANG, R. et al. Changes in the texture, microstructures, colour and volatile compounds of pork meat loins during superheated steam cooking. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 54, n. 10, p. 2821–2830, 27 out. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijfs.14198>>.

WANG, Z. et al. Changes in aroma components and potential Maillard reaction products during the stir-frying of pork slices. **Food Control**, v. 123, p. 107855, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107855>>.

WARNER, R. . Measurements of Water-holding Capacity and Color: Objective and Subjective. In: DIKEMAN, M.; DEVINE, C. (Ed.). **Encyclopedia of Meat Sciences**; Klinth, J. W., Dikeman, M., Devine, C. Oxford: Academic Press, 2014. 2p. 164–171.

WARNER, R. D. et al. Systematic review of emerging and innovative technologies for meat tenderisation. **Meat Science**, v. 132, p. 72–89, 1 out. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.241>>.

WASSERMAN, A. E. Thermally produced flavor components in the aroma of meat and poultry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 737–741, 1972. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ac00044a721>>.

WOOD, J. D. et al. The effect of cooking conditions on the eating quality of pork. **Meat Science**, v. 40, n. 2, p. 127–135, 1 jan. 1995. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0309-1740\(94\)00051-8](https://doi.org/10.1016/0309-1740(94)00051-8)>.

YAMAGUCHI, K. et al. Determination of Furosine and Fluorescence as Markers of the Maillard Reaction for the Evaluation of Meat Products during Actual Cooking Conditions. **Food Science and Technology Research**, v. 18, n. 1, p. 67–76, 2012.

YAN, Z.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 84, n. 3, p. 430–440, 1 fev. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.004>>.

YU, P. Protein secondary structures (α -helix and β -sheet) at a cellular level and protein fractions in relation to rumen degradation behaviours of protein: a new approach. **British Journal of Nutrition**, v. 94, p. 655–665, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1079/BJN20051532>>.

ZAMORA, R.; HIDALGO, F. J. Coordinate contribution of lipid oxidation and Maillard reaction to the nonenzymatic food browning. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 45, n. 1, p. 49–59, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10408690590900117>>.

ZHENG, C.; SUN, D. W.; ZHENG, L. Predicting shrinkage of ellipsoid beef joints as affected by water immersion cooking using image analysis and neural network. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1243–1249, 1 abr. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.010>>.

ZHENG, Y. Y. et al. Evaluating the effect of cooking temperature and time on collagen characteristics and the texture of hog maw. **Journal of Texture Studies**, v. 52, n. 2, p. 207–218, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/jtxs.12580>>.

ZHOU, C. Y. et al. The effect of cooking temperature on the aggregation and digestion rate of myofibrillar proteins in Jinhua ham. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 9, p. 3563–3570, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/jsfa.8872>>.

ZHOU, C. Y. et al. Evaluation of the secondary structure and digestibility of myofibrillar proteins in cooked ham. **CYTA - Journal of Food**, v. 17, n. 1, p. 78–86, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1554704>>.